

Onderzoek naar de invloed van de water/cement-factor
op de mechanische eigenschappen van zand-cement
dekvloeren en naar het hechtingsgedrag van
zand-cement dekvloeren op een betonnen ondergrond

Hannes Riské

Promotor: prof. dr. ir. Stijn Matthys
Begeleider: ir. Peter De Pauw

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

Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Instituut permanente vorming van de faculteit Ingenieurswetenschappen
en Architectuur (IVPV)
Vakgroep Bouwkundige Constructies
Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2011-2012



Onderzoek naar de invloed van de water/cement-factor
op de mechanische eigenschappen van zand-cement
dekvloeren en naar het hechtingsgedrag van
zand-cement dekvloeren op een betonnen ondergrond

Hannes Riské

Promotor: prof. dr. ir. Stijn Matthys
Begeleider: ir. Peter De Pauw

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

Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Instituut permanente vorming van de faculteit Ingenieurswetenschappen
en Architectuur (IVPV)
Vakgroep Bouwkundige Constructies
Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2011-2012



Voorwoord

Deze thesis maakt deel uit van het TETRA-project 'Plaatsingstijdstip van afwerklagen op cementgebonden dekvloeren' en is mogelijk gemaakt door de steun van het agentschap voor Innovatie door Wetenschap en Technologie[1] en de cofinanciering van enkele andere bedrijven. Het projectteam bestaat hoofdzakelijk uit Peter De Pauw, Tanja Gryspeer, Tinne Vangheel en Veerle Boel. Elk jaar werken er enkele thesisstudenten aan mee, zowel aan de Hogeschool Gent als aan de Universiteit Gent.

Dit jaar hebben Mattias Van Hijfte en ikzelf van de UGent de kans gekregen om aan dit onderzoek deel te nemen, waarvoor ik onze promotor prof.dr.ir. Stijn Matthys wil bedanken. Er zijn uiteraard nog tal van mensen die een serieuze dankuwel verdienen voor de hulp bij het tot stand komen van dit werk.

Uiteraard wil ik Peter De Pauw bedanken als mijn begeleider omdat hij deze taak echt ter harte genomen heeft. Hij was altijd bereid om te helpen, mijn vragen bleven nooit onbeantwoord en zijn interesse in het onderzoek werkte heel aanstekelijk. Tot slot wens ik hem te bedanken voor het vele naleeswerk.

Verder wil ik Mattias bedanken voor zijn bereidheid tot samenwerken. Ondanks het feit dat onze thesissen los van elkaar staan, hebben we elkaar steeds gesteund en geholpen wanneer dit nodig was en dat verlichtte het vele laboratoriumwerk.

Ook de medewerkers van het laboratorium Magnel verdienen op zijn minst een vermelding: Tommy voor het (steeds opnieuw) inplannen; Nathan, Tom, Stefan, Jan, Peter, Nicolas, Bart en Marc voor de talrijke uren assistentie en de deskundige uitleg bij de verschillende proeven.

Daarnaast wil ik Daniel Verastegui en Tim Soetens bedanken om mij meer uitleg te verschaffen over en te helpen bij respectievelijk de Proctorproef en de afschuivingsproef.

Uiteindelijk gaat mijn dank uit naar iedereen die ik hier vergeten ben en naar mijn familie, mijn vrienden en mijn vriendin Tine voor de onvoorwaardelijke steun.

"De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef."

"The author gives permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use. In the case of any other use, the limitations of the copyright have to be respected, in particular with regard to the obligation to state expressly the source when quoting results from this master dissertation."

4 juni 2012
Hannes Riské

Overzicht

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

Titel: Onderzoek naar de invloed van de water/cement-factor op de mechanische eigenschappen van zand-cement dekvloeren en naar het hechtingsgedrag van zand-cement dekvloeren op een betonnen ondergrond

Auteur: Hannes Riské

Promotor: prof.dr.ir. Stijn Matthys

Begeleider: ir. Peter De Pauw

Onderzoeksgroep: Laboratorium Magnel voor Betononderzoek

Vakgroep: Bouwkundige constructies

Vakgroepvoorzitter: prof.dr.ir. Luc Taerwe

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Universiteit Gent
Academiejaar 2011-2012

Samenvatting

Deze thesis maakt deel uit van een TETRA (TEchnologie TRAnsfer) project. Dit project heeft als doel om het ideale plaatsingstijdstip te bepalen van de vloerafwerking op cementgebonden dekvloeren. De focus van deze thesis ligt op de invloed van de water/cement-factor op de mechanische eigenschappen van zand-cement. Hiertoe worden twee samenstellingen onderzocht met water/cement-factoren 0,7 en 0,8. De resultaten van deze standaardproeven kunnen gebruikt worden in een grotere studie die alle parameters beschouwt. Er wordt verder gekeken dan deze resultaten om meer te weten te komen van het materiaal. Hiervoor worden enkele extra proeven uitgevoerd zoals de Proctorproef, de vochtmetingen, de bepaling van de afschuifsterkte en bijkomende drukproeven.

Daarnaast wordt het hechtingsgedrag bestudeerd. Dit gebeurt voor de hechting van zowel een dekvloer op een betonnen ondergrond als een gelijmde tegel op een dekvloer. De hechtsterkte wordt telkens beschouwd loodrecht op en evenwijdig met het contactoppervlak tussen de verschillende materialen. Dit aspect is nog niet eerder onderzocht in het TETRA project. Vandaar dat er nieuwe proefmethodes voorgesteld worden in dit werk.

Uit de analyse van de proefresultaten volgen enkele belangrijke conclusies. Het blijkt dat de graad en methode van verdichten een zéér bepalende invloed heeft op de uiteindelijke sterkte van het zand-cement. De verdichting is zo belangrijk dat de invloed van de water/cement-factor nauwelijks beschouwd kan worden voor de mechanische eigenschappen. Een ontwikkeling van een standaardprocedure voor het verdichten van proefstukken kan dit probleem verhelpen. Uit de proeven van het hechtingsgedrag kan men wel een invloed van de water/cement-factor afleiden. Een hogere water/cement-factor zal net als een grotere oppervlakteruwheid van de ondergrond betere hechting veroorzaken tussen zand-cement en beton. Voor de hechting van de gelijmde tegel op zand-cement is vooral de lijmsoort van belang en niet de samenstelling van het zand-cement.

Trefwoorden - Zand-cement dekvloeren, water/cement-factor, mechanische eigenschappen, hechting, verdichting

Research on the influence of water/cement ratio on the mechanical characteristics of cement-based screeds and on adhesion behavior of cement-based screeds on a concrete surface.

Hannes Riské

Supervisors: prof.dr.ir. Stijn Matthys, ir. Peter De Pauw

Abstract – Several experimental tests are conducted in order to examine some aspects of cement-based screeds. This thesis is part of a TETRA (technology transfer) project to determine ideal placement of finishing layers on screeds. The focus is on the influence of water/cement ratio and on adhesion behavior. While analyzing the results, further specific tests have been done. The most important conclusion is the great influence of compaction degree and compaction method on the strength of screeds.

Keywords – cement-based screeds, water/cement ratio, mechanical properties, adhesion, compaction

I. INTRODUCTION

Unfortunately there is a lot of damage to finishing floor layers. The layer beneath these finishing layers is the screed. His influence on this damage is probably important. This material has not been sufficiently studied to know the cause of the damage. That is why a lot of discussion arises about who is responsible. To get to know the material better, this TETRA project was set up. The goal is to establish a practical model to determine ideal placement of finishing layers on cement-based screeds. To achieve this, a lot of experimental research is needed.

This thesis is part of that research. Mechanical properties will be studied for two compositions of which only the water/cement ratio varies. These same tests are also done by other researchers for other compositions in order to know the influence of each parameter. In addition there is a study on the adhesion behavior of screeds. This is an independent part but can also be used for the practical model. There has not yet been done research on these properties so the challenge is to develop new methods.

II. MATERIALS

The compositions of which the mechanical properties are studied in this thesis are given in Table 1. The sand is Rhine sand 0/4. The cement is CEM II/B-M 32,5N.

Table 1: Compositions

Composition	Sand	Cement	W/C
1	1 m ³	250 kg	0.7
2	1 m ³	250 kg	0.8

In order to know if those high water/cement ratios would still give reasonable results, there was first a compressive strength test for ratios 0.5, 0.6, 0.7 and 0.8. The strength for W/C=0.7 and 0.8 was not much lower so it's meaningful to do further research on these compositions. The only difference in the compositions for the research on adhesion behavior is a water/cement ratio 0.6 instead of 0.7 for composition 1.

The test specimens are made in steel casing molds. Compaction is

done by pounding with a steel masher on each layer with 5 cm thickness. Vibration is not possible for sand-cement.

From the moment of making up to the day of testing, the test pieces are kept in an acclimated environment with $(60 \pm 5)\%$ relative humidity and $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. After one day they are taken out of their formwork.

III. INFLUENCE OF THE WATER/CEMENT RATIO ON THE MECHANICAL PROPERTIES

Each test is conducted three times at the age of 1, 2, 3, 7, 14, 28 and 56 days. Every standard test is described in the Belgian norm. For screeds there are a few modifications like a lower loading rate but in general the method is the same.

The compression test is done on cubes with nominal side equal to 158 mm. Prisms with dimensions 600x150x150 mm³ are used to determine flexural and splitting strength. Prisms with dimensions 160x40x40 mm³ are tested for flexural and compressive strength. Cylinders with height 300 mm and diameter 150 mm are made to determine the tensile modulus and cylindrical compressive strength. Finally, the shrinkage is measured on prisms with dimensions 150x150x600 mm³. These are kept in two different acclimated environments: $(60 \pm 5)\%$ relative humidity and $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ or $(>95)\%$ relative humidity and $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. The results of the mechanical properties at the age of 28 days and the final shrinkage (age depends on specimen, but shrinkage was quite stabilized in every case) are given in Table 2 and Table 3.

Table 2: Mechanical properties at the age of 28 days.

	W/C=0.7	W/C=0.8
$f_{ccub158} [N/mm^2]$	11,92	14,11
$f_{buig600} [N/mm^2]$	1,61	1,68
$f_{splitjt} [N/mm^2]$	1,19	1,29
$f_{buig160} [N/mm^2]$	3,03	2,54
$f_{cpr} [N/mm^2]$	11,34	11,18
$E_{cm} [N/mm^2]$	14430,29	14868,79
$f_{ccil} [N/mm^2]$	7,83	9,47

Table 3: Final shrinkage values

	20°C en 60% RH	20°C en 95% RH
W/C = 0.7	0,000582	0,000227
W/C = 0.8	0,000525	0,000197

IV. EXTRA TESTS

The evolution of the relative humidity in a prism 600x150x150 mm³ is measured at three places with a varying depth. The more to the center of the prism, the slower the drying is. In general, relative humidity remains quite high. This is due to slow drying but there's also another aspect that explains the high values. The

sensor was a bit damaged by direct contact with moist material during the compaction of the prism.

A Proctor test is conducted to know the density of the material for different water/cement ratios using a standardized compaction method. These results show that the compaction method used for the test specimens is not at all uniform. This inevitably affects the test results on the mechanical properties.

Shear strength was not yet studied for screeds in the TETRA project. Therefore a simplified theoretical model is made based on the results of the tests on shear strength. This model (Figure 1) gives a linear relationship between shear strength and slip. It can be used for modeling in finite elements programs. The shear strength is determined by pushing out a central portion of the prism along two surfaces.

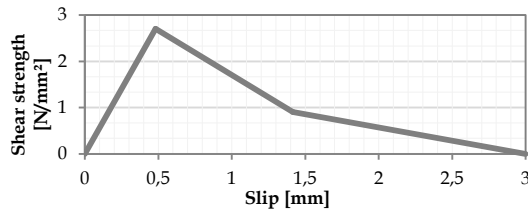


Figure 1: Shear strength vs. slip: theoretical model

V. ADHESION BEHAVIOR

This section can be split up in two parts. Both parts handle the adhesion perpendicular to ("bond strength") and parallel with ("shear strength") the contact surface between the different materials.

The first subject is the adhesion behavior of screeds on a concrete sub layer. Concrete plates are used with a rough and a smooth surface. On these plates a screed layer of 5 cm thickness is placed. For the shear strength, the plates are squares of 158x158 mm², for the bond strength, circular plates with diameter 100 mm are used. Figure 2 shows the developed experimental set-ups. These tests prove that a rougher sub layer and a higher water/cement ratio of the screed cause better adhesion.

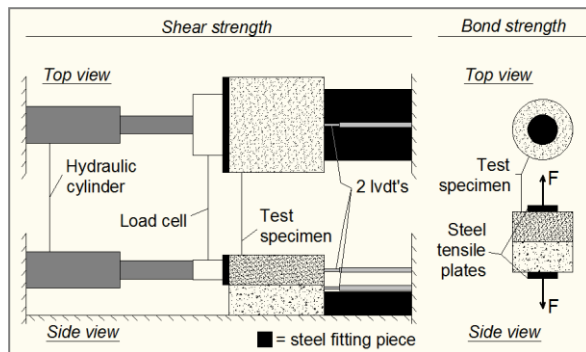


Figure 2: Adhesion tests: screed/concrete. Set-up.

In the second part the adhesion is studied between a ceramic tile, cement-based adhesives and screed material. Two different adhesives are used to make the test specimens. Figure 3 gives the experimental set-ups schematically.

The results of the shear strength show that the adhesion behavior is independent of the screed composition. The strength depends on the adhesive which is used. The bond strength test returns unreliable results because of the bending of the tile.

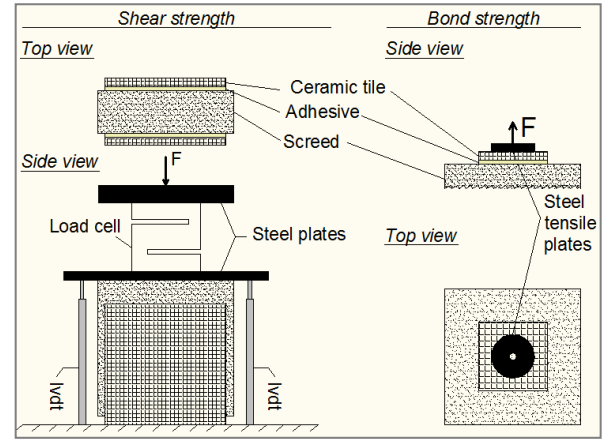


Figure 3: Adhesion tests: tile/adhesive/screed. Set-up.

VI. ANALYSIS

Cubes with different compaction degree and different water/cement ratio were tested on the compressive strength at the age of 28 days. Figure 4 shows the average, maximum and minimum value. It is clear that compaction degree has a much greater impact than the water/cement ratio. Comparison with results from other researchers indicates that besides the degree also the method of compaction influences strength.

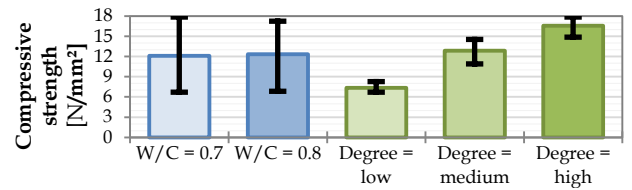


Figure 4: Influence of water/cement ratio and compaction degree on compressive strength

Several characteristics are compared to theoretical relationships for concrete. This shows a good applicability for the screed material. The aging coefficient of concrete can be used to determine the strength of test specimens on other ages than 28 days. It's also possible to make good predictions about shrinkage and shape factors.

Further on there are some other aspects analyzed like the difference between flexural and splitting strength, the relationship between density and compressive strength, ...

At last the author gives some recommendations for further research. The most important advice is to develop a standard procedure to compact the screed material. This will allow researchers to make better comparisons between several test data.

VII. CONCLUSION

The most important conclusion is the great influence of both compaction degree and compaction method on the strength of screed material. The difference in mechanical strength for the tested water/cement ratios is rather small. Higher water/cement ratios are certainly meaningful for screeds. The strength is still satisfactory and the adhesion behavior is even better.

ACKNOWLEDGEMENTS

This thesis would not have been possible without promoter Stijn Matthys and the help of my daily supervisor Peter De Pauw.

Inhoudstafel

HOOFDSTUK 1	INLEIDING	1
1.1	Probleemstelling.....	1
1.2	Doelstelling.....	1
1.3	Opbouw	2
HOOFDSTUK 2	LITERATUURONDERZOEK	3
2.1	Vloeropbouw	3
2.1.1	Inleiding.....	3
2.1.2	Dekvloer	4
2.1.3	Lijm.....	7
2.1.4	Tegels	8
2.2	Cementgebonden dekvloer.....	8
2.2.1	Gebruikte materialen	8
2.2.2	Uitvoering.....	11
2.2.3	Schadegevallen	12
2.3	Invloed water/cement-factor	14
2.4	Hechtingsgedrag	15
2.4.1	Zand-cementlaag op betonnen ondergrond	16
2.4.2	Gelijmde tegels op zand-cement	16
HOOFDSTUK 3	LABORATORIUMPROEVEN.....	18
3.1	Inleiding.....	18
3.2	Vervaardiging proefstukken	19
3.2.1	Gebruikte materialen	19
3.2.2	Onderzochte samenstellingen.....	20
3.2.3	Bekisting	21
3.2.4	Verdichting.....	22
3.2.5	Bewaring.....	22

3.3	Opsplitsing	23
-----	-------------------	----

HOOFDSTUK 4 INVLOED VAN DE WATER/CEMENT-FACTOR OP DE MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN24

4.1	Drukproef.....	24
4.1.1	Proefmethode.....	24
4.1.2	Resultaten	25
4.2	Buig- en slijtproef.....	26
4.2.1	Proefmethode.....	26
4.2.2	Resultaten	27
4.3	Buig- en drukproef	29
4.3.1	Proefmethode.....	29
4.3.2	Resultaten	30
4.4	Stijfheidsontwikkeling.....	32
4.4.1	Proefmethode.....	32
4.4.2	Resultaten	34
4.5	Krimp	36
4.5.1	Proefmethode.....	36
4.5.2	Resultaten	37

HOOFDSTUK 5 EXTRA PROEVEN41

5.1	Vochtmetingen	41
5.1.1	Proefmethode.....	41
5.1.2	Resultaten	42
5.2	Proctordichtheid.....	45
5.2.1	Proefmethode.....	46
5.2.2	Resultaten	46
5.3	Afschuifsterkte van zand-cement	48
5.3.1	Proefmethode.....	48
5.3.2	Resultaten	50
5.3.3	Theoretisch model	54

HOOFDSTUK 6 HECHTINGSGEDRAG58

6.1	Afschuiving tussen zand-cement en beton.....	58
6.1.1	Proefstukken	58
6.1.2	Proefmethode.....	61
6.1.3	Resultaten	63
6.1.4	Theoretisch model	65
6.1.5	Evaluatie proefopstelling	65

6.2	Hechting tussen zand-cement en beton.....	66
6.2.1	Proefstukken	66
6.2.2	Proefmethode.....	67
6.2.3	Resultaten	67
6.2.4	Evaluatie proefopstelling	69
6.3	Afschuiving tegel/lijm/zand-cement.....	69
6.3.1	Proefstukken	69
6.3.2	Proefmethode.....	70
6.3.3	Resultaten	71
6.3.4	Theoretisch model	74
6.3.5	Evaluatie proefopstelling	75
6.4	Hechting tegel/lijm/zand-cement.....	75
6.4.1	Proefstukken	75
6.4.2	Proefmethode.....	76
6.4.3	Resultaten	77
6.4.4	Evaluatie proefopstelling	79
HOOFDSTUK 7 ANALYSE VAN DE RESULTATEN		80
7.1	Verdichting en volumemassa	80
7.1.1	Verdichtingsgraad en - methode.....	81
7.1.2	Bruikbaarheid van andere proefresultaten	84
7.1.3	Verband tussen volumemassa en druksterkte	86
7.1.4	Uitdroging	88
7.2	Verschil buig- en splijttreksterkte.....	89
7.3	Druksterkte in functie van de ouderdom.....	92
7.4	Vormfactoren	95
7.4.1	Druksterkte.....	96
7.4.2	Buigtreksterkte.....	97
7.5	Hechting	98
7.5.1	Zand-cement op betonnen ondergrond	98
7.5.2	Gelijmde tegel op zand-cement of beton.....	99
7.6	Aanbevelingen	100
HOOFDSTUK 8 SAMENVATTING VAN DE RESULTATEN		101
BIJLAGEN		104
Bijlage A	Technische fiche CEM II/B-M 32,5 N [34].....	105
Bijlage B	Resultaten drukproef bij variërende W/C	106

Bijlage C	Resultaten drukproef	108
Bijlage D	Resultaten buig- en splijtproef.....	113
Bijlage E	Resultaten buig- en drukproef	119
Bijlage F	Resultaten stijfheidsontwikkeling	121
Bijlage G	Krimpmetingen	123
Bijlage H	Vochtmetingen	130
Bijlage I	Afschuiving zand-cement.....	133
Bijlage J	Grafieken afschuiving zand-cement	134
Bijlage K	Grafieken afschuiving zand-cement op betonnen ondergrond	135
Bijlage L	Technische fiches lijm.....	137
Bijlage M	Grafieken afschuiving van tegel gelijmd op zand-cement	141

Lijst van tabellen

Tabel 1: Druksterkteklassen voor dekvloeren.....	6
Tabel 2: Buigtreksterkteklassen voor dekvloeren.....	6
Tabel 3: Sterkte-eisen op basis van vloertype en gebruik volgens NEN 2741 [4]	6
Tabel 4: Classificatie van tegellijmen [18]	7
Tabel 5: UPEC-classificatie [18]	8
Tabel 6: Classificatie volgens NBN-EN 14411 [18]	8
Tabel 7: Ruwe indeling cementtypes op basis van NBN EN 197-1	9
Tabel 8: Indeling van cement op basis van de sterkte [21]	9
Tabel 9: Resultaten enquête: welk cementtype voor hechtende dekvloer [8]	10
Tabel 10: Resultaten enquête: welke cementsterkte voor hechtende dekvloer [8]	10
Tabel 11: Resultaten enquête: welk cementgehalte voor hechtende dekvloer [8]	10
Tabel 12: Bepaling van D van de korrelmaat voor zand volgens NBN EN 12620 [22]	10
Tabel 13: Resultaten enquête: zandsoort [8]	11
Tabel 14: Classificatie op basis van indrukking conform BS 8204-1 [25]	11
Tabel 15: Verhouding van kubusdruksterkte voor $W/C=0,7$ tot $W/C=0,8$ op basis van theoretische wetten	15
Tabel 16: Resultaten zeping zand	19
Tabel 17: Onderzochte samenstellingen	20
Tabel 18: Druksterktes $[N/mm^2]$ van kubussen met zijde 158mm	25
Tabel 19: Buigtreksterktes $[N/mm^2]$ van prisma's 600x150x150 mm ³	28
Tabel 20: Splijttreksterktes $[N/mm^2]$ van prisma's 600x150x150 mm ³	28
Tabel 21: Buigtreksterktes $[N/mm^2]$ van prisma's 160x40x40 mm ³	30
Tabel 22: Druksterktes $[N/mm^2]$ van helften van prisma's 160x40x40 mm ³	31
Tabel 23: E-moduli $[N/mm^2]$ bepaald met cilinders met diameter 150mm, hoogte 300mm	35
Tabel 24: Druksterktes $[N/mm^2]$ van cilinders met diameter 150mm, hoogte 300mm	36
Tabel 25: Theoretische waarden voor de krimpvervorming [-]	38
Tabel 26: Gemeten eindwaarden (met ouderdom) voor de krimpvervorming [-]	38
Tabel 27: Correctheid van de relatieve vochtigheid in de geacclimatiseerde ruimtes	39
Tabel 28: Resultaten van de Proctorproef	48
Tabel 29: Afschuifsterkte en splijttreksterkte van prisma's op 28 dagen ouderdom	53
Tabel 30: Vier punten van het theoretisch model voor de afschuifsterkte van zand-cement	56
Tabel 31: Gemiddelde waarden voor het theoretisch model	56
Tabel 32: Afschuifsterkte van zand-cementlaag op een betonnen ondergrond	64
Tabel 33: Hechtsterkte van zand-cementlaag op een betonnen ondergrond	68
Tabel 34: Afschuifsterktes van een gelijkde tegel op zand-cement	73
Tabel 35: Gemiddelde waarden van het eindpunt van de stijgende tak van het theoretisch model	75
Tabel 36: Hechtsterkte van een gelijkde tegel op zand-cement	77
Tabel 37: Gemiddelde hechtsterktes volgens water/cement-factor en oppervlakteruwheid	78
Tabel 38: Data waarop de proefstukken voor de standaardproeven gemaakt zijn	80
Tabel 39: Volumemassa's (na 28 dagen) in functie van de verdichtingsgraad	82
Tabel 40: Druksterktes (na 28 dagen) in functie van de verdichtingsgraad	82
Tabel 41: Kubusdruksterktes voor de verschillende samenstellingen	83
Tabel 42: Kubusdruksterktes op 28 dagen van alle proefstukken ifv slechts één eigenschap	86

Tabel 43: Experimentele tegenover theoretische druksterktes met ouderdomscoëfficiënt van beton	94
Tabel 44: Experimentele tegenover theoretische druksterktes met ouderdomscoëfficiënt van beton op basis van de nieuwe waarde op 28 dagen voor $W/C=0,7$	95
Tabel 45: Vormfactoren voor druksterkte in functie van de ouderdom.....	96
Tabel 46: Vergelijking tussen experimenteel bepaalde en theoretische (voor beton) vormfactoren	96
Tabel 47: Vormfactoren voor buigtreksterkte in functie van de ouderdom	98
Tabel 48: Overzicht van de sterktes op een ouderdom van 28 dagen. Alle waarden zijn in N/mm^2 ..	101
Tabel 49: Resultaten hechtingsgedrag van zand-cement op betonnen ondergrond. Alle waarden in N/mm^2	102
Tabel 50: Resultaten hechtingsgedrag van een gelijmde tegel op zand-cement. Alle waarden in N/mm^2	102

Lijst van figuren

Figuur 1: Klassieke vloeropbouw [3]	3
Figuur 2: Hechtende dekvloer [15]	5
Figuur 3: Niet-hechtende dekvloer [15]	5
Figuur 4: Zwevende dekvloer [15]	5
Figuur 5: Schotelen van de dekvloer veroorzaakt opkrullen van de randen[27]	12
Figuur 6: Spanningsbeeld in een dekvloer voor en na scheurvorming [9]	14
Figuur 7: Vergelijking van verschillende wetten voor druksterkte ifv water/cement-factor	15
Figuur 8: Zeefkromme van het in deze thesis gebruikte zand 0/4	19
Figuur 9: Menginstallatie laboratorium Magnel.....	20
Figuur 10: Druksterkte voor verschillende water/cement-factoren, ouderdom 29 dagen.....	21
Figuur 11: Verdichtingsgewichten van 5kg (links) en verdichtingsstaven (rechts)	22
Figuur 12: Kleine pers (tot 200kN) en grote pers voor drukproeven.....	24
Figuur 13: Verloop van de kubusdruksterkte in functie van de tijd	26
Figuur 14: Buig- en splijtproef op prisma's	27
Figuur 15: Verloop van de buigtreksterkte (prisma's 600x150x150 mm ³) in functie van de tijd	28
Figuur 16: Splijttreksterktes van de helften van prisma's 600x150x150 mm ³ in functie van de ouderdom.....	29
Figuur 17: Buig- en drukproef op kleine prisma's.....	29
Figuur 18: Verloop van de buigtreksterkte (prisma's 160x40x40 mm ³) in functie van de tijd.....	31
Figuur 19: Druksterkte op 56 dagen ouderdom van de prismahelften 160x40x40 mm ³ met aanduiding van maximale en minimale waarden voor beide W/C's.....	32
Figuur 20: Druksterktes van helften van prisma's (160x40x40 mm ³) in functie van de tijd	32
Figuur 21: Voorbereiding en proefopstelling voor de bepaling van de E-modulus.....	33
Figuur 22: Diagram van een proef ter bepaling van de E-modulus	34
Figuur 23: E-modulus in functie van de ouderdom bepaald met cilinders met diameter 150 mm, hoogte 300 mm	35
Figuur 24: Het verloop van de druksterkte van cilinders (diameter 150 mm, hoogte 300 mm) ifv de tijd	36
Figuur 25: Meting van de krimp met het Demectoestel	37
Figuur 26: De gemiddelde krimpvervorming van prisma's 600x150x150 mm ³	39
Figuur 27: Proefopstelling vochtmeting	41
Figuur 28: Metingen van de relatieve vochtigheid.....	42
Figuur 29: Nauwkeurigheid van de metingen.....	43
Figuur 30: Evolutie van de hoeveelheid vocht die in een volume van 1m ³ aanwezig zou zijn met de gemeten relatieve vochtigheid en temperatuur in het proefstuk	44
Figuur 31: Relatieve vochtigheid van de sensor op 30 mm diepte wanneer deze uit het proefstuk gehaald wordt	45
Figuur 32: Proctorproef: links de stalen mal, rechts de hamer	46
Figuur 33: Volumemassa's voor vier verschillende W/C-factoren, zowel vers als na 29 dagen	47
Figuur 34: Resultaten van de Proctorproef.....	48
Figuur 35: Afschuiving, proefopstelling: met kleine prisma's.....	49
Figuur 36: Afschuiving, proefopstelling van ir. Tim Soetens	49
Figuur 37: Schematische voorstelling met aanduiding afmetingen.....	50

Figuur 38: Verschil in weergave tussen de geregistreeerde (= "echte") waarden en het voortschrijdend gemiddelde (proefstuk 0,6-1)	51
Figuur 39: Evolutie in de tijd van de 3 scheuren bij afschuiving.....	52
Figuur 40: Wigvorming bij de afschuifproef op zand-cementprisma's.....	53
Figuur 41: Kracht/verplaatsing-diagram voor 0,7-1. Absolute verplaatsing van het midden.	54
Figuur 42: Kracht/verplaatsing-diagram voor 0,7-1. Absolute verplaatsing tpv het steunpunt.....	55
Figuur 43: Kracht/verplaatsing-diagram voor 0,7-1. Slip.....	55
Figuur 44: Kracht/verplaatsing-diagram voor 0,7-1. Slip, na linearisering van het begin en het theoretische model.....	56
Figuur 45: Theoretisch model voor de afschuiving van zand-cement	57
Figuur 46: Betonnen platen. Links: ruw. Rechts: glad	59
Figuur 47: Betonplaten met zand-cement (na vervaardiging). Links: ruw. Rechts: glad.....	59
Figuur 48: Poging tot boren. Links: Onmogelijk mooie cilinder te verkrijgen. Midden: Plaat komt in zijn geheel los (geen hechting). Rechts: Puin ten gevolge van boren in zand-cement.	59
Figuur 49: Betonnen platen, houten steunblokjes en stalen mal vóór aanbrengen van het zand-cement	60
Figuur 50: Proefstuk 0,6-Glad-1 dat geen hechting vertoont	60
Figuur 51: Extra proefstukken met houten bekisting	61
Figuur 52: Schematische proefopstelling afschuiving zand-cement op betonnen ondergrond.....	62
Figuur 53: Bovenaanzicht van de proefopstelling van afschuifsterkte tussen zand-cement en beton....	62
Figuur 54: Links: detail lvd't's. Rechts: Detail vizel met meetcel en stalen verdeelplaat	62
Figuur 55: Proefstuk als T-vormig geheel.....	62
Figuur 56: Kracht/verplaatsingsdiagram voor afschuivingsproef van zand-cement op beton (0,8-ruw-2).....	63
Figuur 57: Fout in de registratie van de verplaatsing door kantelen.....	64
Figuur 58: Proefstukken in regenbuizen.....	66
Figuur 59: Links: trekschijf op beton. Rechts: ontkist proefstuk met zowel boven als onder een trekschijf.....	66
Figuur 60: Proefstuk in het trektoestel	67
Figuur 61: Breuk bij hechtingsproef. In beton (links), in zand-cement (midden) of in de hechtingslaag (rechts)	68
Figuur 62: Proefstukken (bovenaan schematisch) ter bepaling van de afschuifsterkte zand-cement/lijm/tegel	70
Figuur 63: Proefopstelling afschuifsterkte zand-cement/lijm/tegel	71
Figuur 64: Kracht/verplaatsingsdiagram van 0,6-F-1 bij de afschuivingsproef "zand-cement/lijm/tegel"	72
Figuur 65: Breuk na afschuiving met links het breukvlak "lijm/tegel" en rechts het breukvlak in de lijm	72
Figuur 66: Invloed van water/cement-factor en lijmsoort op de afschuifsterkte	73
Figuur 67: Kracht/slipdiagram van 0,6-F-1 na linearisering van het begin	74
Figuur 68: Theoretisch model. Stijgende tak voor afschuiving van een gelijmde tegel op zand-cement.	75
Figuur 69: Proefstuk van de hechtingsproef. Links: foto. Rechts: Schematisch bovenaanzicht.....	76
Figuur 70: Proefopstelling voor hechting van een gelijmde tegel op zand-cement.....	77
Figuur 71: Breukvlakken bij hechtingsproef zand-cement/lijm/tegel. Links: tegel komt van lijm ("tegel/lijm"). Rechts: breuk zand-cement.	77
Figuur 72: Breuk bij hechtingsproef van een gelijmde tegel op een betonnen kubus	78
Figuur 73: Mate van verdichting. Links: zwak. Rechts: hard.	81

Figuur 74: Verschil in breuk van de kubussen. Links: normaal. Rechts: splijt (foto van HOGent)	83
Figuur 75: Vergelijking van de kubusdruksterkte voor $W/C=0,7$ en $0,8$ met $W/C=0,6$ (referentiesamenstelling)	84
Figuur 76: Kubusdruksterktes op 28 dagen van alle proefstukken ifv slechts één eigenschap	85
Figuur 77: Druksterktes van kubussen met ouderdom 28 dagen in functie van de volumemassa's	87
Figuur 78: Volumemassa's van kubussen met $W/C=0,7$ in functie van de ouderdom	88
Figuur 79: Absolute afname van de volumemassa's voor kubussen met $W/C=0,7$	89
Figuur 80: Relatieve afname van de volumemassa's voor kubussen met $W/C=0,7$	89
Figuur 81: Trekspanningen ten gevolge van de splijtproef ter plaatse van de belaste doorsnede	90
Figuur 82: Lineaire spanningsdiagram bij een driepuntsbuigproef	90
Figuur 83: Buig- en splijttreksterkte voor water/cement-factoren $0,7$ en $0,8$ ifv de tijd	91
Figuur 84: Experimentele tegenover theoretische druksterktes met ouderdomscoëfficiënt van beton..	93
Figuur 85: Experimentele tegenover theoretische druksterktes met ouderdomscoëfficiënt van beton op basis van de nieuwe waarde op 28 dagen voor $W/C=0,7$	94
Figuur 86: Vormfactoren in functie van de tijd.....	97

Tabel van gebruikte afkortingen

Afkorting	Betekenis
c_v	Variatiecoëfficiënt
E_{cm}	Secans-elasticiteitsmodulus [N/mm ²]
$\epsilon_{cs}(t)$	Krimp op tijdstip t [-]
$f_{afschuif}$	De afschuifsterkte van zand-cementprisma's 600x150x150 mm ³ [N/mm ²]
$f_{buig160}$	Buigtreksterkte van zandcementprisma's 160x40x40 mm ³ [N/mm ²]
$f_{buig600}$	Buigtreksterkte van zand-cementprisma's 600x150x150 mm ³ [N/mm ²]
f_{ccil}	Druksterkte cilinders h300mm, ϕ 150 mm [N/mm ²]
$f_{ccub158}$	Druksterkte van zand-cementkubussen met zijde 158 mm [N/mm ²]
f_{cpr}	Druksterkte zand-cementprismahelften 160x40x40 mm ³ [N/mm ²]
f_{splijt}	Splijttreksterkte van zand-cementprismahelften 600x150x150 mm ³ [N/mm ²]
$lvdt$	Elektronische verplaatsingsmeter
RV	Relatieve vochtigheid [%]
ρ	Volumemassa [kg/m ³]
σ	Standaardafwijking
s	Slip [mm]
W/C	Water/cement-factor [-]
$\bar{x}$	Gemiddelde

Hoofdstuk 1

Inleiding

1.1 Probleemstelling

Schade aan de vloerafwerking is jammer genoeg een veel voorkomend fenomeen. De laag onder deze vloerafwerking is de dekvloer en deze heeft een belangrijke invloed op de schade. Door de gebrekkige kennis over de dekvloer is de oorzaak van de schade echter vaak zoek en kan er bovendien moeilijk iemand verantwoordelijk gesteld worden. Onzekerheid over het materiaal is de aanleiding geweest om een TETRA-project (TEchnologie TRAnsfer door instellingen van hoger onderwijs [1]) op te starten in juli 2010.

Er is in de normen en technische voorschriften onvoldoende informatie aanwezig om voor een bepaalde samenstelling van de dekvloer ondubbelzinnig te kunnen bepalen wanneer de vloerafwerking geplaatst kan worden. Er zijn zowel voor vroege als late plaatsing argumenten te vinden. Het TETRA-project, getiteld 'Plaatsingstijdstip van afwerklagen op cementgebonden dekvloeren - Van model naar plaatsingsprotocol', heeft als doel om zekerheid te scheppen over het juiste plaatsingstijdstip van de afwerklagen, en dit specifiek voor cementgebonden dekvloeren.

1.2 Doelstelling

Een belangrijke doelstelling van het TETRA-project is het opstellen van een praktijkmodel dat het gedrag van de vloer kan voorspellen, en dit van een dekvloer in het bijzonder. De bijdrage van deze thesis bestaat onder andere uit het onderzoeken van zowel mechanische (tijdsafhankelijke ontwikkeling van de druk-, buig-, trek-, afschuifsterkte en de stijfheidsontwikkeling van het gebruikte materiaal) als fysische (volumemassa) eigenschappen en tijdsafhankelijke vervormingen (krimp). [2]

Specifiek voor deze thesis worden de mechanische eigenschappen onderzocht door een uitgebreid proefprogramma in het laboratorium Magnel. Dit onderzoek is uitgespreid over twee thesen aan de UGent. Mattias Van Hijfte zal zich toeleiden op de variatie van cementgehalte en een uitgebreid literatuuronderzoek over de vloeropbouw en innovatieve technieken. Dit werk zal de eigenschappen van de dekvloer bestuderen voor een variabele water/cement-factor. Er wordt een grondige analyse gedaan van de proefresultaten om enkele interessante verbanden af te leiden. Ten slotte is het de bedoeling om meer te weten te komen over het hechtingsgedrag van dekvloeren.

1.3 Opbouw

In Hoofdstuk 2 komt een literatuuronderzoek, waardoor de lezer een indruk krijgt van het begrip “cementgebonden dekvloer” en tevens wordt er gekeken naar de gangbare praktijk.

Vervolgens wordt in Hoofdstuk 3 meer uitleg verschaft over het laboratoriumonderzoek: de wijze waarop de proefstukken vervaardigd worden, de bewaring van deze proefstukken, de samenstellingen, ... Hoofdstuk 4 behandelt het gedeelte van de proeven die zowel voor een variabel cementgehalte als voor een variabele water/cement-factor uitgevoerd werden. Zowel de proefmethode als de resultaten worden hier weergegeven. Deze thesis behandelt hiernaast nog enkele extra proeven, waarvan de methode en de resultaten weergegeven worden in Hoofdstuk 5.

Hoofdstuk 6 vertegenwoordigt het tweede gedeelte van de titel. Hier wordt het hechtingsgedrag bestudeerd. Waar in het eerste proefgedeelte standaardproeven worden uitgevoerd, is het hier de uitdaging om zelf proefstukken en proefmethodes te ontwikkelen. De grootteordes van de hechtsterkte zijn ongekend. Een perfecte uitvoering kan nooit gevonden worden in het tijdsbestek van een thesis, maar er werd getracht om zo goed mogelijk met alle factoren rekening te houden. Zowel hechtings- als afschuivingsproeven komen ter sprake. Deze werden uitgevoerd voor zand-cement op een betonnen ondergrond en voor proefstukken waarbij tegels gelijmd zijn op zand-cement.

Een analyse van al deze proefresultaten – zowel van de standaardproeven als van de extra proeven en verbanden doorheen de verschillende proeven – kan men terugvinden in Hoofdstuk 7. Een samenvatting van alle resultaten staat in Hoofdstuk 8.

Tot slot worden er enkele bijlagen meegegeven met deze thesis. Zo kan de thesistekst beperkt blijven tot de essentie van de resultaten maar beschikt de geïnteresseerde lezer toch over alle nodige informatie om verder onderzoek te kunnen verrichten.

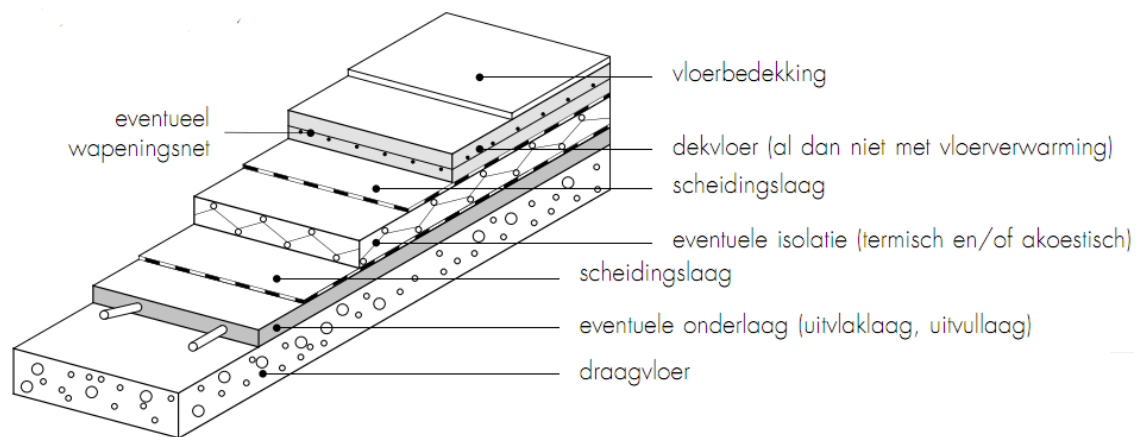
Hoofdstuk 2

Literatuuronderzoek

2.1 Vloeropbouw

2.1.1 Inleiding

Figuur 1 geeft een voorbeeld van een vloeropbouw weer. Uiteraard zijn er vele varianten op de wijze van bouwen, maar van belang voor deze thesis is de functie van de dekvloer. Schematisch kan gesteld worden dat de klassieke vloer opgebouwd is uit drie hoofdlagen, zijnde de draagvloer, de dekvloer en de vloerbedekking. Er zijn nog talrijke extra lagen mogelijk waarvan er enkele op de figuur weergegeven worden.



Figuur 1: Klassieke vloeropbouw [3]

Over de draagvloer, die meestal uit beton bestaat, waarbij men denkt aan welfsels, kanaalplaatvloeren, enzovoort zijn er talrijke documenten en wetmatigheden ter beschikking die het mogelijk maken om voor bepaalde randvoorwaarden de geschikte oplossing te vinden. Zelden zal het gebeuren dat er schadegevallen voorkomen te wijten aan een onvoldoende kennis over de betonnen draagvloer. Dit is voor de dekvloer enigszins anders. Van belang in deze thesis zijn de dekvloer, de lijm en de tegels (als vloerafwerking). Deze elementen worden verder in detail besproken.

2.1.2 Dekvloer

De dekvloer kan verschillende functies hebben. Met de (betonnen) ondergrond is het praktisch en financieel een moeilijke zaak om een bepaalde gewenste hoogte te bereiken. Zeker als een mooi egaal oppervlak vereist is, wordt er een dekvloer geplaatst die deze taak op zich kan nemen. Op dit vlak oppervlak kan dan vervolgens de vloerafwerking geplaatst worden of de dekvloer kan zelf dienen als vloerafwerking als deze bijvoorbeeld gepolijst wordt. [4]

2.1.2.1 Bindmiddel

Als bindmiddel voor het vervaardigen van een dekvloer kan gebruik gemaakt worden van cement, calciumsulfaat, magnesiet, gietasfalt of kunsthars. In België worden vooral de eerste twee toegepast en deze zullen kort besproken worden. [5]

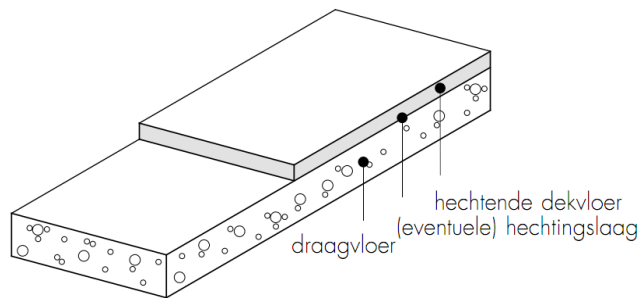
Calciumsulfaatgebonden dekvloeren, vaak anhydrietdekvloeren genoemd, hebben als bindmiddel CaSO_4 : een watervrij gips dat na contact met water verhardt. De voordelen van deze dekvloer zijn onder andere een snelle verharding, minimale krimp, grote productiesnelheid, goede vlakheid en de mogelijkheid tot kleinere laagdiktes. De belangrijkste nadelen zijn een lagere slijtvastheid, geen vochtresistentie vanwege het niet-hydraulische bindmiddel, een dunne toplaag (bindmiddel huid) met veel lagere cohesie karakteristieken en de veel hogere kostprijs. [6] [7] [8] [9]

Cementgebonden dekvloeren zijn nog steeds de meest toegepaste. Deze soort wordt in deze thesis verder onderzocht. Het bindmiddel is zoals de naam al doet vermoeden cement en dat is een hydraulisch bindmiddel. Dat brengt meteen als belangrijkste voordeel mee dat deze dekvloeren in tegenstelling tot de calciumsulfaatgebonden dekvloer wél vochtresistent zijn. Eens de vloer verhard is, zal vocht geen invloed meer hebben op de sterkte omdat het cement al gehydrateerd is. Dit laat plaatsing toe in binnen- en buitenomgevingen die vochtig kunnen zijn. Andere voordelen zijn de goede consistentie van het materiaal (geen uitvloeiing), de mogelijkheid tot aanleggen van hoogteverschillen, hoge slijtvastheid, de compatibiliteit met alle vloerafwerkingen en uiteraard de lagere prijs. Als nadeel kan vermeld worden dat het een vrij arbeidsintensief werk is dat tevens het nodige vakmanschap vereist. Tevens is er een grotere laagdikte nodig en door het gebruik van cement is er meestal onvermijdelijke scheurvorming. [10] [4][8]

2.1.2.2 Type

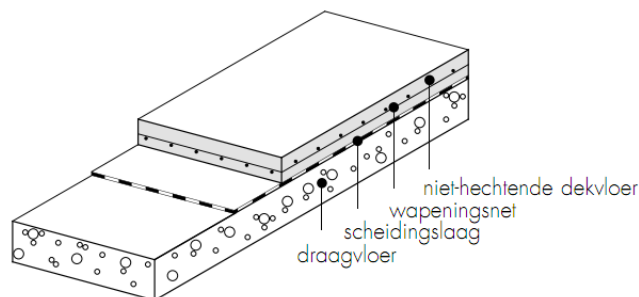
Qua type zijn er drie hoofdcategorieën te onderscheiden: de hechtende, niet-hechtende en zwevende dekvloer.

Een **hechtende dekvloer** wordt rechtstreeks op de betonnen ondergrond geplaatst. Deze ondergrond dient stofvrij te zijn en er mag zich geen cementmelk op bevinden. Verder mogen er geen scheuren in het beton zijn om een geschikte plaatsing van de dekvloer mogelijk te maken. Soms worden er kunststofvezels (bijvoorbeeld Harbourite) in de dekvloer geplaatst om krimpscheuren binnen de perken te houden. Er kan wapening geplaatst worden boven leidingen bijvoorbeeld, maar vaak volstaat het om een grotere dikte te nemen van de dekvloer. De verdichting van een hechtende dekvloer dient te gebeuren in lagen van maximaal 4cm om goede hechting tussen ondergrond en dekvloer te bekomen. Tussen de betonnen ondergrond en het zand-cement kan eventueel nog een hechtingslaag geplaatst worden. Figuur 2 geeft een doorsnede van een hechtende dekvloer. In deze thesis wordt het hechtingsgedrag van een hechtende dekvloer zonder hechtingslaag bestudeerd. [11] [12] [13] [14]



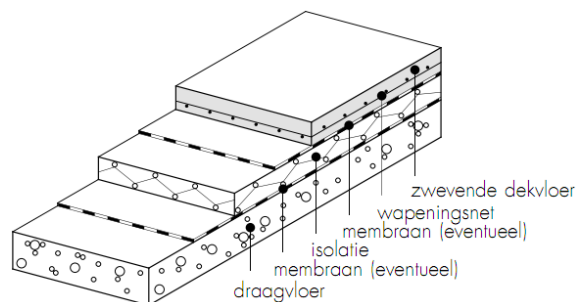
Figuur 2: Hechtende dekvloer [15]

Een **niet-hechtende dekvloer** wordt gescheiden van de ondergrond door een tussenlaag te plaatsen (bijvoorbeeld een kunststoffolie). In tegenstelling tot een hechtende dekvloer, dienen er nu voegen in de vloer geplaatst te worden om de hygrothermische bewegingen van de vloer te kunnen opvangen. Ook wordt er meestal een wapeningsnet geplaatst om de spanningen beter te verdelen. Een niet-hechtende dekvloer wordt bijvoorbeeld toegepast als er geen zekerheid is van een voldoende duurzame hechting of als men een vochtgevoelige of dampdichte afwerking wil. [15] [11]



Figuur 3: Niet-hechtende dekvloer [15]

Een **zwevende dekvloer** wordt verkregen als er zich tussen dekvloer en ondergrond een isolatielaag bevindt. Het nut van deze isolatielaag kan akoestisch en/of thermisch zijn. Door deze opbouw is de dekvloer moeilijker te verdichten maar wegens de aanwezige buigspanningen dient er toch sowieso wapening geplaatst te worden. De buigtreksterkte is voor zwevende dekvloeren een eis die bij de vorige types niet van belang is. De dikte van de dekvloer kan in evenredig verband gebracht worden met de buigtreksterkte ervan en de vereiste dikte stijgt nog als in de vloer verwarming of koeling aanwezig is. Een voordeel van de zwevende dekvloer is dat scheuren in de ondergrond niet doorgetrokken worden tot in de dekvloer. [11] [6] [12]



Figuur 4: Zwevende dekvloer [15]

Ten slotte zijn er varianten mogelijk op deze types zoals dekvloeren met vloerverwarming, dekvloeren met onderlaag, ... welke hier niet verder besproken worden.

2.1.2.3 Classificatie

Er bestaan verschillende sterkteklassen voor dekvloeren. Tabel 1 en Tabel 2 geven de verschillende klassen weer voor de druk- en buigtreksterkte. Hierin staat de C (van compression) voor druksterkte en de F (van flexural) voor buigtreksterkte. Beide waarden zijn uitgedrukt in N/mm². De subindex w duidt aan dat men hier sterktes in het werk bedoelt. Men dient rekening te houden met het feit dat de sterkte op de werf vaak zal verschillen van deze van mortelbakjes in het labo (waarvan de sterktes aangeduid worden met respectievelijk C en F - zonder subindex dus - maar met dezelfde klasse-indeling). De druksterkte van een handmatig verdichte dekvloer in het werk kan immers 40% lager gelegen zijn dan deze voor een op een ideale wijze verdicht proefstuk. Om te vermijden dat er uitschieters van sterkte in negatieve zin bijzitten, moeten alle waarden minstens 85% van de eis halen welke gegeven wordt in de tabellen. [9][5]

Tabel 1: Druksterkteklassen voor dekvloeren

Sterkte-aanduiding	C _w 5	C _w 7	C _w 12	C _w 16	C _w 20	C _w 25	C _w 30	C _w 35	C _w 40	C _w 50	C _w 60	C _w 70	C _w 80
Gemiddelde druksterkte [N/mm ²]	5	7	12	16	20	25	30	35	40	50	60	70	80

Tabel 2: Buigtreksterkteklassen voor dekvloeren

Sterkte-aanduiding	F _w 1	F _w 2	F _w 3	F _w 4	F _w 5	F _w 6	F _w 7	F _w 10	F _w 15	F _w 20	F _w 30	F _w 40	F _w 50
Gemiddelde buigtreksterkte [N/mm ²]	1	2	3	4	5	6	7	10	15	20	30	40	50

Deze sterkteklassen kunnen gelinkt worden aan het type dekvloer en zijn toepassingsgebied. De minimaal benodigde sterktes op basis van NEN 2741 worden weergegeven in Tabel 3 voor respectievelijk hechtende, niet-hechtende en zwevende dekvloeren. [4]

Tabel 3: Sterkte-eisen op basis van vloertype¹ en gebruik volgens NEN 2741 [4]

EIGENSCHAP	Vloertype en gebruik					
	Direct op draagvloer		Op scheidingslaag		Zwevend	
	Woningbouw	Utiliteit	Woningbouw	Utiliteit	Woningbouw	Utiliteit
Druksterkte	C _w 5 - C _w 7	≥ C _w 12	C _w 5 - C _w 7	≥ C _w 20	-	-
Buigtreksterkte	-	-			F _w 1 - F _w 7	F _w 1 - F _w 7

In wat volgt wordt – tenzij anders vermeld – met een dekvloer steeds een cementgebonden dekvloer² bedoeld.

¹ “Direct op de draagvloer” = hechtend en “Op scheidingslaag” = niet-hechtend

2.1.3 Lijm

Een lijmverbinding van een tegel op de dekvloer bestaat uit een driedelig geheel. Er is de contactlaag tussen de lijm en de dekvloer, de contactlaag tussen de lijm en de tegel en uiteraard de lijmlaag zelf. Schade aan de lijmverbinding kan te wijten zijn aan onvoldoende sterkte in één van deze drie delen zodat de sterkte van de verbinding maar even sterk is als de zwakste schakel in het geheel. Daarom moet men aan alle aspecten voldoende aandacht schenken. Twee sterkte-eigenschappen zijn hier van belang, namelijk adhesiesterkte tussen lijm en contactoppervlak en cohesiesterkte in de lijmlaag zelf. [16]

Hoewel sommigen beweren dat de lijm redelijk vroeg aangebracht kan worden op de dekvloer, kan men zich beter houden aan een voldoende drogingstermijn van de dekvloer. De lijm moet namelijk in staat zijn om de krimpvervormingen op te vangen. Vaak wordt gekozen voor een flexibele, meer vloeibare lijm bij vroege plaatsing. Omdat deze in dunne lagen aangebracht wordt, is hij niet geschikt om de krimpvervormingen op te vangen. Daarnaast is er nog het overvloedige vocht in de dekvloer dat een verzwakking van de lijmlaag kan veroorzaken. [17]

Er zijn hoofdzakelijk twee soorten tegellijm te onderscheiden, namelijk kleefmortels (of poederlijm) en kleefpasta's (of pastalijm). Kleefmortels moeten voor de plaatsing nog door de plaatser zelf vervaardigd worden door mengen met water. Kleefpasta's zijn reeds gebruiksklaar maar daar staat een hogere kostprijs en langere verhardingsperiode tegenover. In de Europese norm EN 12004 is een classificatie (Tabel 4) opgenomen voor tegellijmen, welke een indeling maakt op basis van de aard van de lijm, zijn verwerkingskarakteristieken en finale prestaties. [18]

Tabel 4: Classificatie van tegellijmen [18]

Aard	Finale prestaties	Verwerkingskarakteristieken
C Kleefmortel	1 Normale hechting	F Snelle binding
D Kleefpasta	2 Verbeterde hechting	T Hoge afglijdingsweerstand
		E Verlengde open tijd

Hierin zijn alle combinaties behalve een F bij kleefpasta mogelijk. Zo is C1T bijvoorbeeld een kleefmortel met een normale hechting en een hoge afglijdingsweerstand. Voor de klasse C2 is er in de norm EN 12002 nog een extra verdeling opgenomen volgens de vervormbaarheid. De klassen C2S1 en C2S2 kunnen een transversale vervorming ondergaan die voor de eerste klasse gelegen is tussen 2,5 en 5mm en voor de tweede klasse is deze groter dan 5mm.[18]

In de tabel is sprake van een open tijd. Dit is de tijdspanne tussen het opensmeren van de lijm en de effectieve plaatsing van de tegels. Deze is over het algemeen beperkt zodat men geen grote oppervlaktes mag lijmen als men deze niet rap genoeg kan betegelen. Zo wordt voorkomen dat er een zwakkere hechting optreedt door vorming van een film op de lijmrillen. Een ander begrip is de zogenaamde pot-life. Dit is de periode tussen het openen van de pastalijmpot of mengen van de poederlijm en het verwerken. De pot-life is vele malen groter dan de open tijd (verschillende uren of dagen tegenover een tiental minuten) en mag hiermee dus zeker niet verward worden. [7]

² Vaak wordt in de benaming gebruik gemaakt van een verwijzing naar de twee hoofdbestanddelen van de cementgebonden dekvloer, zijnde zand en cement. Zo wordt er gesproken van "het zand-cementmateriaal" of de "zand-cementdekvloer".

2.1.4 Tegels

Er zijn verschillende soorten vloerafwerking mogelijk. Denk maar aan tapijt, parket, laminaat, enzovoort. Tegels zijn slechts één van de vele mogelijkheden maar worden wel meer en meer toegepast. In deze thesis zal bij het bestuderen van de hechtsterkte gebruik gemaakt worden van een keramische tegel. Naast keramische tegels zijn er nog andere mogelijkheden zoals natuursteen, glasmozaïek, cementtegels, betontegels, ... Keramische tegels hebben in vergelijking met natuursteen bijvoorbeeld als voordeel dat ze goedkoper zijn maar toch nog een goede hardheid en duurzaamheid bezitten. De keuze van de tegel gebeurt voornamelijk op basis van een persoonlijke voorkeur en minder op basis van sterkte-eigenschappen. De lijmsoort is eerder afhankelijk van de gekozen tegel dan omgekeerd omdat de vloerafwerking een zichtbaar deel is van de vloer. [19]

De keramische tegel, welke gebruikt wordt bij de hechttingsproeven, moet echter wél voldoen aan enkele voorwaarden. Deze zijn afhankelijk van het soort lokaal waarin ze geplaatst worden. Lokalen kunnen ingedeeld worden volgens de UPEC-classificatie. Deze wordt gegeven in Tabel 5 en de eis wordt strenger bij een hoger getal. De tegels die gebruikt worden moeten om te voldoen minimaal dezelfde waarden hebben als deze van het lokaal. Soms kan het gebeuren dat er extra voorwaarden opgelegd zijn aan de bekleding. De norm NBN-EN 14411 heeft nog een andere classificatie voor keramische tegels op basis van de porositeit en productiewijze (waarbij A een getrokken en B een geperste tegel is). Deze indeling wordt gegeven in Tabel 6. [18]

Tabel 5: UPEC-classificatie [18]

Afkorting	Betekenis	Klassen
U	Slijtage door belopen	2 - 2s - 3 - 3s - 4
P	Puntbelasting (statisch of mobiel)	2 - 3 - 4 - 4s
E	Waterbestendigheid	1 - 2 - 3
C	Scheikundige stoffen	0 - 1 - 2 - 3

Tabel 6: Classificatie volgens NBN-EN 14411 [18]

Porositeit	Waterabsorptie	Klassen
Laag	$E \leq 0,5\%$	BI _a
	$0,5\% < E \leq 3\%$	BI _b
Gemiddeld	$3\% < E \leq 6\%$	BII _a of AII _a
	$6\% < E \leq 10\%$	BII _b of AII _b
Hoog	$E > 10\%$	AIII of BIII

2.2 Cementgebonden dekvloer

2.2.1 Gebruikte materialen

De bestanddelen van een cementgebonden dekvloer zijn cement, zand en water.

2.2.1.1 Cement

Cement is een hydraulisch bindmiddel, wat inhoudt dat cement met water een verbinding aangaat die achteraf niet meer in water oplosbaar is. Cement is één van de hoofdbestanddelen van beton. [20]

Er zijn verschillende cementtypes op de markt welke opgedeeld kunnen worden in 5 groepen (Tabel 7). De percentages die weergegeven zijn bij de hoofdbestanddelen zijn de grenzen waarbinnen de hoeveelheid van dat bestanddeel zich bevindt. In NBN EN 197-1 is er een veel uitgebreidere indeling te vinden. Er wordt naar daar verwezen als men de bestanddelen van elk afzonderlijk type wil kennen. Hier is dit niet van belang aangezien er maar met één cementsoort gewerkt wordt, zijnde CEM II-B/M, waarvan de productfiche terug te vinden is in Bijlage A. [21]

Tabel 7: Ruwe indeling cementtypes op basis van NBN EN 197-1

Type	Naam	Hoofdbestanddelen
I	Portlandcement	Klinker (95-100%)
II	Portlandcomposietcement	Klinker (65-94%) Hoogovenslak, kalksteen, vliegias, silica fume, puzzolaan (6-35%)
III	Hoogovencement	Klinker (5-64%) Hoogovenslak (36-95%)
IV	Puzzolaancement	Klinker (45-89%) Silica fume, puzzolaan en/of vliegias (11-55%)
V	Composietcement	Klinker (20-64%) Hoogovenslak (18-50%) Puzzolaan en/of vliegias (18-50%)

Verder kan er nog een sterkteklasse toegekend worden aan het cement. Deze waarde staat voor de druksterkte gemeten op een ouderdom van 28 dagen en wordt bepaald volgens de norm NBN EN 196-1. In deze norm staat eveneens beschreven hoe de cementsterkte op jongere ouderdom bepaald kan worden. Aan de naamgeving van het cement is nog een extra letter L, N of R toegevoegd welke respectievelijk staan voor een lage, normale of sterke beginsterkte (Tabel 8).

Tabel 8: Indeling van cement op basis van de sterkte [21]

Sterkteklasse	Vroege druksterkte [N/mm ²]		Standaarddruksterkte [N/mm ²]	
	2 dagen	7dagen	28 dagen	
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 10,0	-	≥ 32,5	≤ 52,5
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 R	≥ 20,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-
52,5 R	≥ 30,0	-	≥ 52,5	-

Cementen met sterke beginsterkte harden veel rapper uit, wat de hogere druksterkte op jonge ouderdom verklaart. De klasse met een lage beginsterkte is enkel van toepassing voor de hoogovencementen. De uiteindelijke sterkte speelt een rol bij de sterkte van de dekvloer zelf. Voor hechting en krimp is deze cementsterkte van veel minder belang. [8][21]

In [8] zijn de resultaten terug te vinden van een bevraging onder 20 bedrijven die dekvloeren maken. De vermelde percentages slaan op de bedrijven die dat bepaalde antwoord gaven van het totaal dat

geantwoord heeft op de vraag. De hoeveelheid cement wordt voor dekvloeren uitgedrukt in een aantal kg per kubieke meter zand.

Tabel 9: Resultaten enquête: welk cementtype voor hechtende dekvloer [8]

Cementtype	CEM I	CEM II	CEM III/B	CEM V/A
Percentage van de bevraagde bedrijven [%]	40	45	5	10

Tabel 10: Resultaten enquête: welke cementsterkte voor hechtende dekvloer [8]

Sterkteklasse cement [N/mm ²]	32,5	42,5	52,5
Percentage van de bevraagde bedrijven [%]	90	5	5

Tabel 11: Resultaten enquête: welk cementgehalte voor hechtende dekvloer [8]

Cementgehalte [kg/m ³ zand]	160	170	180	190	200	220	230	240	250	>250
Percentage van de bevraagde bedrijven [%]	4,76	4,76	14,29	4,76	28,56	14,29	9,52	4,76	23,81	0

Uit deze bevraging blijken CEM I en CEM II de meest gebruikte cementsoorten met heel duidelijk 32,5 als meest voorkomende sterkteklasse. Het cementgehalte varieert, maar meestal wordt 200 of 250 kg cement per kubieke meter zand gebruikt. Uiteraard zijn alle resultaten slechts op basis van een bevraging bij 20 bedrijven, maar ze geven wel een indicatie.

2.2.1.2 Zand

Zand is een steenachtig granulaat dat ontstaat door de natuurlijke desintegratie van gesteenten en de korrels zijn meestal kleiner dan 2mm maar kunnen tot 5mm groot zijn. Het in België meest gebruikte zand voor beton is Rijnzand. De granulometrie is de belangrijkste eigenschap van het zand. Deze wordt bepaald door zieving met behulp van zeven met diameters die bepaald worden volgens een meetkundige reeks. De experimentele bepaling gebeurt volgens NBN EN 933-1. Het materiaal wordt eerst op de zeef met de grootste opening geplaatst om vervolgens altijd kleinere zeven toe te passen. Het gewicht dat op een zekere zeef blijft liggen wordt opgeteld bij het gewicht dat op alle grotere zeven bleef liggen. Zo kan een gecumuleerde hoeveelheid berekend worden die uitgedrukt wordt in een percentage van de totale hoeveelheid. Dit percentage trekt men af van 100% om de doorval door de desbetreffende zeef te kennen. Door de zeefopening in de abscis (volgens een logaritmische schaal met basis 2) en het doorvalpercentage in ordinaat uit te zetten, wordt de zeefkromme verkregen. In paragraaf 3.2.1 wordt als voorbeeld de zeefkromme weergegeven van het in deze thesis gebruikte zand 0/4. De korrelmaat d/D geeft de onder- (d) en bovengrens (D) waartussen de belangrijkste fractie van het materiaal zich bevindt. [20]

Voor een fijn materiaal als zand zal d volgens NBN EN 12620 gelijk genomen worden aan 0. Ervan uitgaande dat $D \leq 4$ mm, kan D bepaald worden door na te gaan of aan volgende eisen voor de doorvalpercentages voldaan is. [22]

Tabel 12: Bepaling van D van de korrelmaat voor zand volgens NBN EN 12620 [22]

	2*D [mm]	1,4*D [mm]	D [mm]
Doorvalpercentage [%]	100	95 tot 100	85 tot 99

Ook betreffende de keuze van de zandsoort werd een bevraging gedaan in [8]. De resultaten worden gegeven in Tabel 13.

Tabel 13: Resultaten enquête: zandsoort [8]

Gebruikte zandsoort	Rijnzand 0/3	Rijnzand 0/5	Rijnzand 0/7	Ander
Percentage van de bevroagde bedrijven [%]	45	15	30	10

2.2.1.3 Aanmaakwater

Het gebruikte aanmaakwater moet zuiver zijn en mag geen schadelijke stoffen bevatten. De hoeveelheid zuren, alkaliën, sulfaten, suikers, vetten en organische stoffen dienen beperkt te blijven zoals opgegeven in de norm NBN B15-102. [15]

2.2.2 Uitvoering

Het verdichten van een dekvloer in de praktijk gebeurt nog steeds voornamelijk door manueel aandammen met handen en voeten en door spanen. De verdichting die op de werf gerealiseerd wordt, veroorzaakt zoals reeds vermeld lagere druksterktes dan in het laboratorium. Aangezien een cementgebonden dekvloer een niet-vloeibaar, snelhardend materiaal is, is het een handenwerk dat het nodige vakmanschap vereist. [4][10] [23]

Een veel gehoord principe wat de droogtijd betreft, is dat deze een week per cm laagdikte bedraagt (onder andere volgens [24],[9] en vele websites van dekvloer-, lijm- en tegelbedrijven) maar op basis van een navraag bij meer dan 80 bedrijven kan vastgesteld worden dat er nog steeds uiteenlopende meningen zijn over deze drogingstermijn van een dekvloer. Sommigen zijn van oordeel dat er zo snel mogelijk verder gewerkt moet worden en dit omwille van tijdsdruk of de – verwachte – goede eigenschappen van een verse dekvloer. Anderen volgen dan weer technische voorschriften of wachten altijd 28 dagen. Ten slotte baseren veel bedrijven zich op de meting van het vochtgehalte. [23]

Dit vochtgehalte kan gecontroleerd worden met de calciumcarbide methode. De resultaten van deze test zijn betrouwbaar. Er dienen verschillende metingen te gebeuren over het oppervlak van de dekvloer. De diepte dient voldoende groot te zijn omdat de bovenste laag uiteraard steeds droger is dan de lagen daaronder. Onvoldoende diepte bij het testen kan een te vroege plaatsing van de tegels veroorzaken wat dan weer tot schade leidt. [15]

Er bestaat een soort kwaliteitscontrole met de BRE-Screed Test om na te gaan wat de indrukking is in de dekvloer na een aantal malen laten vallen van een gewicht. Deze test heeft naast zijn nauwelijks destructieve karakter als voordeel dat er gewerkt wordt met goedkope, eenvoudig toepasbare apparatuur. Afhankelijk van de bekomen waarde, kan men controleren of deze voldoet aan de vooropgestelde maximeisen voor respectievelijk industrie, kantoorgebouwen of woningbouwen (Tabel 14). [25] [26]

Tabel 14: Classificatie op basis van indrukking conform BS 8204-1 [25]

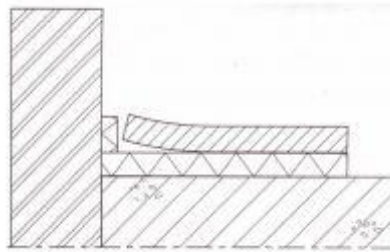
Klasse	A	B	C
Indrukking ten hoogste [mm]	3	4	5
Toepassingsgebied	Industrie	Kantoorgebouw	Woongebouw

Tegenwoordig zijn er voor dekvloeren enkele innovatieve trends. Zo kunnen dekvloeren sneldrogend uitgevoerd worden door toevoeging van een chloridevrije en multifunctionele hulpstof die naast reductie van de droogtijd ook plastificerend en stabiliserend werkt. Er bestaan eveneens spanningsvrije dekvloeren, vloermatten, vloeidekvloeren, ... [24][23]

2.2.3 Schadegevallen

In deze paragraaf worden enkele veel voorkomende schadegevallen besproken.

Een eerste fenomeen dat besproken wordt is het zogenaamde **schotelen** van de dekvloer. Dit houdt in dat de randen opkrullen (Figuur 5). Het wordt veroorzaakt door een snellere uitdroging van de bovenkant in vergelijking met de onderkant van de dekvloer. Deze ongelijkmatige droging doet de bovenkant meer verkorten dan de onderkant waardoor de vloer hol komt te staan. Als deze opgekrulde randen te zwaar belast worden, kan dat scheuren tot gevolg hebben. De neiging tot schotelen kan verminderd worden door de dekvloer af te dekken met een folie gedurende de eerste dagen van droging. Als argument voor een vroeg plaatsingstijdstip van de tegels wordt vaak opgegeven dat schotelen dan vermeden wordt. De uitdroging zou namelijk beperkt worden door het plaatsen van de vloerafwerking. [6] [27] [9]



Figuur 5: Schotelen van de dekvloer veroorzaakt opkrullen van de randen[27]

Onvermijdelijk bij een cementgebonden materiaal zijn de **krimpscheuren**. Krimp kan opgesplitst worden in 3 categorieën. Er ontstaat krimp door het uitzweten van aanmaakwater (bleeding) vlak na het verdichten. Verdamping zorgt ervoor dat dit vocht verdwijnt, maar als de verdamping toeneemt en groter wordt dan de wateruitdrijving treedt er krimp op met fijne scheuren tot gevolg. Door middel van een goede nabehandeling kan dit vermeden of althans beperkt worden. Een tweede soort is thermische krimp. Door de exotherme reactie van cement met water zal de temperatuur stijgen en zal het zand-cement uitzetten. De hieropvolgende afkoeling zal krimp veroorzaken. Als de omgevingstemperatuur – bijvoorbeeld 's nachts – vermindert, dan is er een grote temperatuursafname (en bijkomende krimp). Deze kan het jonge materiaal wegens zijn beperkte treksterkte nog niet aan waardoor scheuren optreden. Scheuren door uitdrogingskrimp ten slotte ontstaan als de vervormingen ten gevolge van de uitdroging van het materiaal verhinderd worden. Het plaatsen van voldoende voegen en het vermijden van overvloedige vochtonttrekking kunnen dit beperken.[9]

Een andere veel voorkomende oorzaak van schade is het **te hoge vochtgehalte**. De dekvloer kan onder de oppervlakte nog te vochtig zijn bij het plaatsen van de vloerafwerking. Dit te hoge vochtgehalte in de middenlagen kan veroorzaken dat het vocht naar boven komt. Dit kan op zijn beurt weer schade veroorzaken aan de vloerafwerking. Het stijgende vocht kan de vloerafwerking doen zwellen zodat deze zichzelf lostrekt van de dekvloer. Als er een lijmlaag geplaatst wordt tussen dekvloer en vloerafwerking kan deze hinder ondervinden van het vocht. De lijmlaag neemt het vocht

op waardoor de kwaliteit afneemt zodat er een onthechting van de vloerafwerking kan voorkomen. [15]

Het **loskomen van de tegels** kan steeds optreden, onafhankelijk van de plaatsing (klassiek, op een natte dekvloer of verlijmd op een droge dekvloer). De oorzaak kan zoals reeds vermeld opstijgend vocht zijn, maar ook andere factoren spelen mee. De krimp van de dekvloer brengt schuifspanningen in de lijmlaag en drukspanningen in de betegeling teweeg. Een flexibelere lijmlaag zal deze drukspanningen verminderen. Naast deze spanningen ten gevolge van krimp zullen de temperatuurschommelingen onvermijdelijke thermische spanningen induceren omdat de uitzettingscoëfficiënten voor tegels en dekvloer verschillen én omdat ze aan verschillende temperaturen onderworpen worden (denk maar aan zonnewarmte op de bovenzijde van de dekvloer of vloerverwarming binnenin). Ook een goede initiële hechting kan een belangrijk middel zijn om de schade te beperken. Deze wordt verbeterd door een goede hechtsterkte van de lijm, een groot contactoppervlak tussen de dekvloer, lijm en tegel en de juiste karakteristieken van dekvloer en tegel. Hierbij wordt dan gedacht aan voldoende porositeit van de tegel en genoeg oppervlaktecohesie en -ruwheid van de ondergrond. Ook een correcte uitvoering is van belang. Zo dient men de lijm aan te brengen op een stof- en vetvrij oppervlak. Zowel wat de lijm als de tegels betreft, moet de plaatser rekening houden met de voorschriften van de fabrikant (uitvoeringstemperatuur, open tijd van de lijm, ...). [7] [28]

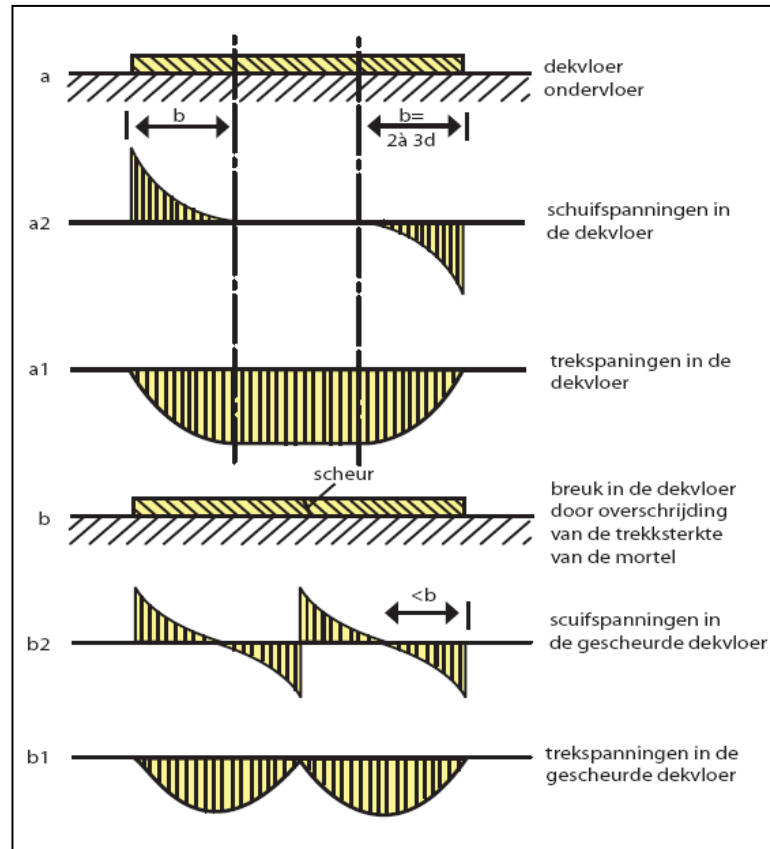
Gelijkaardige hechtingsproblemen ontstaan op volledig analoge wijze in de laag tussen dekvloer en ondergrond. Ook daar zijn de vermelde spanningen aanwezig. Bovendien zal de dekvloer bij doorbuiging onvermijdelijk willen verschuiven over de ondergrond. Dit brengt eveneens extra schuifspanningen met zich mee. Al deze spanningen veroorzaken **onthechtingen** als de afschuifsterkte tussen dekvloer en ondergrond overschreden wordt of scheuren als de treksterkte van het materiaal overschreden wordt. [9]

Figuur 6 toont het **spanningsbeeld** in ongescheurde en gescheurde toestand. Op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat onthechtingen voornamelijk aan de randen zullen optreden omdat de schuifspanningen daar maximaal zijn. De maximale waarde van de schuifspanningen wordt gegeven door onderstaande formule. [9]

$$\tau = \epsilon * \sqrt{k * E * h}$$

Met τ = maximale schuifspanning [N/mm²]
 ϵ = krimp/vervormingsverschil van de afwerklaag [mm/mm]
 k = weerstand van de ondergrond tegen verschuivingen [N/mm²]
 E = elasticiteitsmodulus van de afwerklaag [N/mm²]
 h = de dikte van de afwerklaag [mm]

Hierin is k een parameter die nog onvoldoende onderzocht is. Daarom wordt in deze thesis gekeken naar de afschuifweerstand omdat deze een belangrijke invloed heeft op mogelijke schade.



Figuur 6: Spanningsbeeld in een dekvloer voor en na scheurvorming [9]

De maximale trekspanning (σ) wordt gegeven door de welgekende wet van Hooke $\sigma = E * \epsilon$. Deze waarde is maximaal over een uitgestrekte centrale zone tot op een bepaalde afstand b van de rand. De afstand b is minimaal gelijk aan $6 * \sqrt{(E * h)/k}$ zodat nogmaals de invloed van de parameter k^3 naar boven komt. [9]

Andere vormen van schade zijn scheuren in de ondergrond, zettingsscheuren (bijvoorbeeld ter hoogte van leidingen), oneffenheden, ...

2.3 Invloed water/cement-factor

Het is algemeen geweten dat voor beton de water/cement-factor best zo laag mogelijk gehouden wordt als men hogere sterktes wenst te verkrijgen. Er zijn verschillende curven opgesteld door onderzoekers welke allen een dalende trend voorstellen bij toenemende water/cement-factor. Enkele van de meest bekende zijn de curven voorgesteld door Feret, Abrams, Bolomey, Dutron en Walz. Stelt men ter vergelijking⁴ voorop dat met een water/cement-factor 0,4 op 28 dagen een druksterkte van 40 N/mm² bereikt wordt, dan wordt onderstaande figuur verkregen. In onderstaande vergelijkingen

³ In de andere literatuur wordt deze parameter niet teruggevonden. Mogelijks net omdat er nog onvoldoende onderzoek naar gebeurd is.

⁴ Zoals dit ook in [20] gebeurt.

moeten de parameters aangepast worden om aan de vermelde eis te voldoen. f_{ccub} is de betondruksterkte van kubussen met zijde 200 mm. [20]

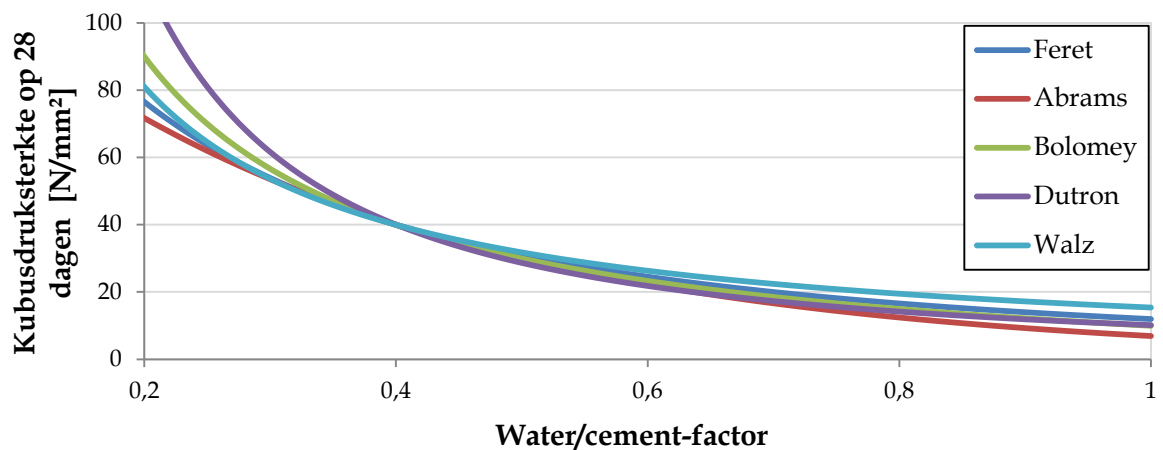
$$f_{ccub} = K_1 * \frac{1}{\left(1 + K_2 * \frac{W}{C}\right)^2} \quad (\text{Ferret})$$

$$f_{ccub} = \frac{K}{7^{1.5 * \frac{W}{C}}} \quad (\text{Abrams})$$

$$f_{ccub} = K * \left(\frac{C}{W} - 0,5\right) \quad (\text{Bolomey})$$

$$f_{ccub} = K * \left(\frac{C}{W}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{Dutron})$$

$$f_{ccub} = 0,46 * f_{cem} * \left(\frac{C}{W} - 0,06\right) \quad (\text{Walz})$$



Figuur 7: Vergelijking van verschillende wetten voor druksterkte ifv water/cement-factor

De theoretisch minimale water/cement-factor bedraagt 0,4: een waterhoeveelheid ter waarde van 0,25 en 0,15 keer de cementshoeveelheid voor respectievelijk de chemische binding met cement en de binding als gelwater. De water/cement-factor wordt meestal groter genomen om een goede verwerkbaarheid te garanderen, maar te grote waarden worden afgeraden. Teveel water toevoegen brengt immers een risico van segregatie teweeg. [20]

Omdat in deze thesis verder onderzoek gebeurt naar de water/cementfactoren 0,7 en 0,8 wordt de verhouding tussen deze beide, zij het enkel voor kubusdruksterkte op 28 dagen ouderdom, reeds even gemaakt op basis van de hierboven gegeven wetmatigheden.

Tabel 15: Verhouding van kubusdruksterkte voor $W/C=0,7$ tot $W/C=0,8$ op basis van theoretische wetten

	Feret	Abrams	Bolomey	Dutron	Walz	Gemiddelde
$f_{ccub_{WC=0,7}}/f_{ccub_{WC=0,8}}$	1,21	1,34	1,24	1,22	1,15	1,23

2.4 Hechtingsgedrag

Er zijn reeds algemene zaken in verband met verschillende materialen en eisen vermeld. Hier wordt dieper ingegaan op het hechtingsgedrag aangezien dit experimenteel bestudeerd wordt in deze thesis.

2.4.1 Zand-cementlaag op betonnen ondergrond

De vereiste hechtsterkte is dubbelzinnig gedefinieerd zodat naar uitvoering toe moeilijk verantwoordelijken aangeduid kunnen worden bij eventuele fouten. In de norm NEN 2741 is in de versie van 2008 opgenomen dat er onthechtingen toegelaten zijn tussen de dekvloer en de ondergrond, op voorwaarde dat de diameter van de oppervlaktes van deze zones beperkt blijft tot zes maal de vloerdikte en langs de randen slechts drie maal de vloerdikte. De hechtsterkte wordt bepaald door de kracht die nodig is om de dekvloer van de ondergrond te trekken in verticale zin. [26] [29]

De norm is duidelijk over aspecten als buig- en druksterkte maar huidtreksterkte van de dekvloer is nog steeds een punt van discussie zodat er problemen kunnen ontstaan naar vloerafwerking toe. Als er toch sprake is van een eis, dan bedraagt deze $0,5 \text{ N/mm}^2$ met als minimum $0,3 \text{ N/mm}^2$. Hogere waarden kunnen niet gegarandeerd worden. De huidtreksterkte wordt bepaald door de kracht die nodig is om een stuk uit de bovenlaag van de dekvloer zelf los te trekken. [26] [29]

De norm NBN EN 13892-8 vermeldt een procedure om de hechting van een dekvloer op een betonnen ondergrond te testen. Men moet een zand-cementlaag aanbrengen op een betonnen plaat en achteraf worden hier kernen uitgeboord of tegels uitgezaagd waarop men vervolgens met een hogesterktelijm centraal trekschijven lijmt. Door deze trekschijven te bevestigen aan de daarvoor geschikte apparatuur kan men vervolgens de hechtsterkte bepalen. [30]

In de norm is enkel sprake van een hechtsterkte door proeven met een trekkracht loodrecht op het contactoppervlak. In dit werk zal eveneens het effect van een kracht evenwijdig met dit contactoppervlak bestudeerd worden.

2.4.2 Gelijmde tegels op zand-cement

Vroeger was er geen norm voor de definitie van een flexibele lijm. Daardoor kwamen er steeds meer producten op de markt waarvan beweerd werd door de producent dat zij flexibel waren, zonder dit echter ergens op te kunnen/moeten baseren. Daarom zijn de normen EN 12002 en EN 12004 een zege geweest omdat zij respectievelijk eisen oplegden voor transversale vervorming en hechtsterkte.

Deze normen zijn wel een eerste stap in de goede richting, maar nog steeds is een meer precieze omschrijving van de proefmethode nodig. Enkele onnauwkeurigheden in de opgelegde testprocedure van EN 12002 zorgen ervoor dat de proefresultaten niet altijd zo maar vergeleken mogen worden en dat de verkregen sterkte nog erg afhankelijk is van waar en hoe deze vastgelegd is. Een andere beperking van de norm is dat er geen verband gelegd wordt tussen vervormbaarheid en hechtsterkte. [31]

Ook voor de testprocedures uit de norm EN 12004 is nog een betere omschrijving mogelijk. Daarnaast is hij beperkt omdat er bij het testen van de hechtsterkte slechts één soort ondergrond bekeken wordt. In deze thesis worden de tegels gelijmd op zand-cement, maar hiernaast wordt voor elke soort een proefstuk gemaakt waarbij de tegels op beton geplaatst worden om de eventuele invloed hiervan na te gaan. Een andere kritiek die op deze norm gemaakt kan worden is het testen van de hechtsterkte door middel van een verticale kracht welke loodrecht aangrijpt op de horizontale hechtingslaag. In de praktijk zal een tegel/lijm/ondergrond-verbinding nooit aan zulke krachten onderworpen worden. Het gevaar zit hem in het horizontaal afschuiven van de tegel ten gevolge van de relatieve horizontale verplaatsing van de ondergrond. Ook daarom zal verderop in dit werk eveneens gekeken worden

naar de hechtsterkte (“afschuifsterkte”) als de kracht evenwijdig met het gelijmde oppervlak uitgeoefend wordt. Er is echter wel een zekere moeilijkheid bij het uitvoeren van dergelijke proeven. Daarom zullen de bekomen resultaten enkel als indicatie dienen. [31]

In de norm NBN EN 1348 wordt een proefmethode beschreven voor het testen van keramische tegels gelijmd op een betonnen ondergrond. Er wordt gebruik gemaakt van een betonnen plaat waarop een lijm laag gelegd wordt om vervolgens tien tegels met afmetingen 50x50 mm² te plaatsen. Op deze tegels wordt na 27 dagen een trekschijf met dezelfde afmetingen als de tegel gelijmd met een hogesterktelijm en met de juiste apparatuur kan dan zo de hechtsterkte (op basis van trek) bepaald worden. Deze methode is echter niet toegepast in deze thesis. Enerzijds is de beschikbare apparatuur geschikt om cirkelvormige trekschijven te gebruiken met diameters 50 of 100 mm in plaats van vierkante trekschijven. Anderzijds is het eenvoudiger om kubussen dan platen te vervaardigen in zand-cement. [32]

Het valt op te merken dat de normen enkel spreken over sterktes op een ouderdom van 28 dagen. Dit wordt bevestigd door zowel het bedrijf Compaktuna (welke de in deze thesis gebruikte lijmen P.T.B-Kleefcement PLUS en FLEXcement ® produceert) als de heer Denis Vyncke (vertegenwoordiger van Femo en reeds 30 jaar in het vak van lijmen). In verband met het hechtingsgedrag van lijm in functie van de ouderdom is nog geen verder onderzoek gebeurd. Men kan zich hierbij afvragen of dit niet relevant zou zijn omdat sommige lijmsorten cementgebaseerd zijn en dus pas hun sterkte verkrijgen na verloop van tijd. Daarom zal de sterkte op 28 dagen vermoedelijk nog een deel hoger zijn dan de sterkte op jongere ouderdom (in deze thesis wordt getest op ouderdom van 3 en 7 dagen). In de praktijk is het namelijk goed mogelijk dat men geen 28 dagen wacht tot men de betegelde vloer belast.

Hoofdstuk 3

Laboratoriumproeven

3.1 Inleiding

Aangezien het een experimentele thesis betreft, werden alle proeven - na de nodige opleiding - zelfstandig uitgevoerd waardoor er ontelbare uren werk in het laboratorium gespendeerd zijn. Een zeer groot aandeel van deze thesis is gekropen in het verkrijgen en het verwerken van alle proefresultaten. Deze niet vermelden zou dus zonde zijn, al zal dit in de thesistekst beperkt blijven tot de essentie. Zo zullen de uiteindelijke gemiddelde sterktes voor elke ouderdom en water/cement-factor in de tekst terug te vinden zijn, maar niet alle metingen afzonderlijk. De meeste resultaten worden ter informatie wél meegegeven in de bijlagen. De geïnteresseerde lezer wordt dus naar de bijlagen verwezen om de uitgebreide resultatenfiches te bekijken.

In verband met de grafieken dient opgemerkt te worden dat er tussen de resultaten vaak rechten getrokken worden. Deze zouden de lezer verkeerdelijk kunnen doen vermoeden dat voor tussengelegen waarden van de x-coördinaat de y-coördinaat via lineaire interpolatie verkregen kan worden. Er werd in desbetreffende gevallen echter gekozen voor deze weergave omdat het duidelijk de evolutie weergeeft van de y-coördinaat en dit zonder een lineair verband te willen insinueren.

Verder mag men zich bij het bekijken van deze grafieken niet blind staren op gemiddelde waarden. Te allen tijde moet men in het achterhoofd houden dat deze gemiddelden door het beperkte tijdsbestek in 1 academiejaar meestal slechts bekomen zijn door 3 waarden per resultaat. Er is bijgevolg een onvermijdelijke spreiding aanwezig op de proefresultaten. In de tabellen wordt de variatiecoëfficiënt c_v weergegeven. In onderstaande definities is n het aantal onderzochte proefstukken, x de waarde van één resultaat, $\bar{x}$ het gemiddelde en σ de standaardafwijking. [33]

$$c_v = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

De voorkeur gaat naar de variatiecoëfficiënt in plaats van de standaardafwijking omdat deze een relatieve spreiding aangeeft terwijl de standaardafwijking automatisch toeneemt voor hogere sterktes. Dit zou dus onjuist doen vermoeden dat er voor oudere proefstukken (hogere sterkte) meer variatie is.

3.2 Vervaardiging proefstukken

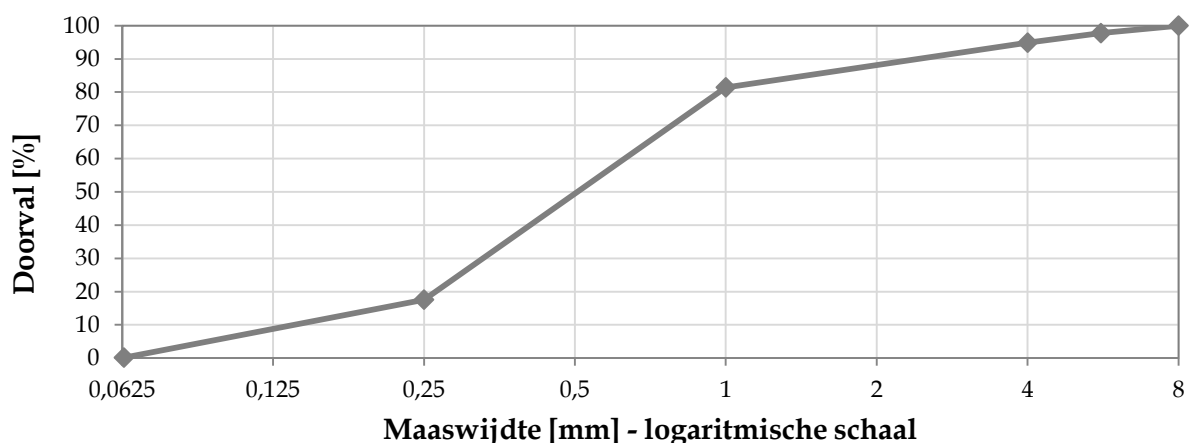
3.2.1 Gebruikte materialen

Zoals in het literatuuronderzoek vermeld, zijn er verschillende cementsoorten. In deze thesis wordt gebruik gemaakt van een CEM II/B-M 32,5N van Holcim, waarvan de technische fiche meegegeven wordt in Bijlage A. Het is een portlandcomposietcement en bestaat voornamelijk uit portlandklinker (tussen 65% en 79%), silicumhoudende vliegashoudende en gegranuleerde hoogovenslak. De sterkte van dit cement op 28 dagen ouderdom bedraagt minstens 32,5 N/mm² en het heeft een normale sterkte op jonge leeftijd. [34]

De bepaling van de korrelmaat van het zand werd reeds theoretisch uitgelegd in paragraaf 2.2.1.2. Van het in deze thesis gebruikte zand werd door zeving de zeefkromme en de korrelmaat bepaald. Er werden 2 monsters van elk ongeveer 200 gram gebruikt.

Tabel 16: Resultaten zeving zand

Maasopening [mm]	Gecumuleerde zeefrest [gr]		Procentueel gemiddelde [%]	
	Monster 1	Monster 2	Gecum. zeefrest	Doorval
8	0,0	0,0	0,00	100,00
5,6	4,1	4,9	2,26	97,74
4	9,6	10,8	5,13	94,87
1	35,0	38,8	18,57	81,43
0,25	161,7	165,8	82,43	17,57
0,063	197,7	199,0	99,85	0,15
0	198,1	199,2	100,00	0,00



Figuur 8: Zeefkromme van het in deze thesis gebruikte zand 0/4

Met behulp van de opgesomde eisen in Tabel 12, kan hier geconcludeerd worden dat het zand van het type 0/4 is aangezien er voldaan wordt aan de doorvaleisen (respectievelijk 100, groter dan 95, tussen 85 en 99%) voor de maaswijdtes 8; 5,6 en 4 mm. Het gebruikte zand wordt steeds op voorhand gedroogd in open lucht.

Het gebruikte water is gewoon kraantjeswater waarmee voldaan wordt aan de eisen. Deze zijn ter informatie vermeld in paragraaf 2.2.1.3.

Al deze materialen worden eerst afgewogen waarbij nauwkeurigheid gegarandeerd is tot op 0,05 kg. Eerst wordt het zand en het cement in de menginstallatie (Figuur 9) gebracht waarna gedurende één minuut droog gemengd wordt. Vervolgens wordt het water toegevoegd en wordt er nog twee minuten nat gemengd. In deze menginstallatie kan tot 200 liter materiaal.



Figuur 9: Menginstallatie laboratorium Magnel

3.2.2 Onderzochte samenstellingen

Voor de bepaling van de samenstellingen werd als referentie de samenstelling gebruikt die eerder in het laboratorium Magnel onderzocht werd. De eigenschappen van deze samenstelling zijn te vinden in Tabel 17 onder de naam M1-250-0,6. De parameters van deze samenstelling werden constant gehouden, enkel de water/cement-factor varieert.

De hoeveelheid zand wordt uitgedrukt in volume. Het aantal kilogram zand dat gebruikt wordt, kent men door de schijnbare volumemassa van het zand te bepalen. Men bepaalt wel degelijk de schijnbare en niet de werkelijke volumemassa van het zand. Dit komt vanwege de grote porositeit van het zand-cement. De holtes zullen nooit volledig opgevuld worden zodat er van de werkelijke volumemassa geen sprake is.

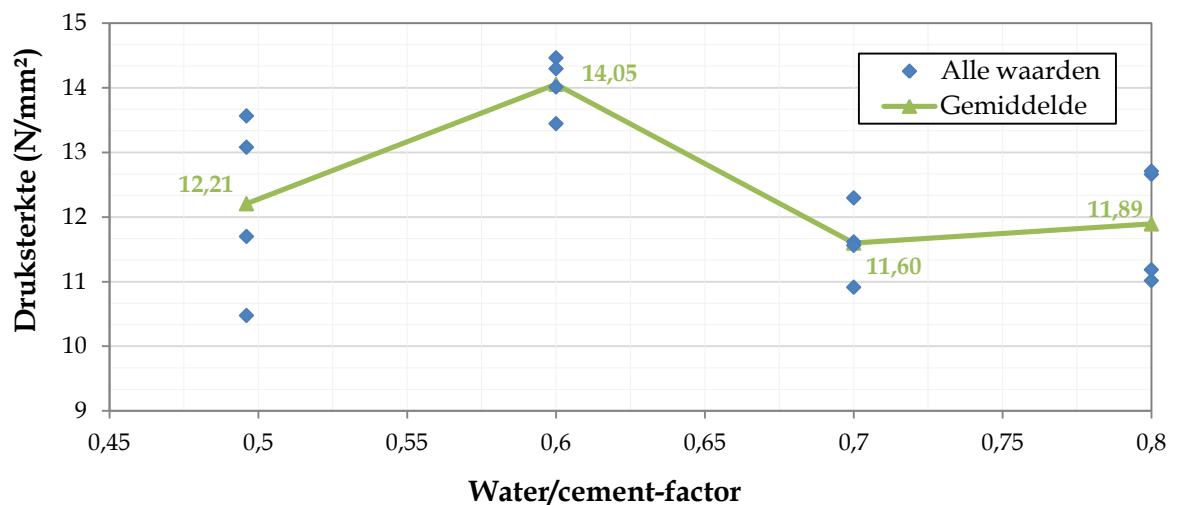
Tabel 17: Onderzochte samenstellingen

Samenstelling	Zand	Cement	W/C
M1-250-0,6	1 m ³ (type 0/4)	250 kg (CEM II/B-M 32,5N)	0,6
HR1-250-0,7	1 m ³ (type 0/4)	250 kg (CEM II/B-M 32,5N)	0,7
HR2-250-0,8	1 m ³ (type 0/4)	250 kg (CEM II/B-M 32,5N)	0,8

Het valt tevens op dat de water/cement-factoren vermeld in Tabel 17 hoger zijn dan in betonsamenstellingen. Waar bij beton voor water/cement-factoren groter dan 0,7 de sterktes reeds

gehalveerd zijn in vergelijking met een water/cement-factor van 0,4 zal er bij zand-cement niet zo'n grote terugval in sterkte zijn. Tot nu toe was de grootst onderzochte verhouding 0,6 en nog steeds leken de sterktes niet af te nemen in vergelijking met lagere W/C. Om die reden werd geopteerd om verder onderzoek te doen naar samenstellingen met nog grotere W/C.

Om zeker te zijn dat de sterkte voor een water/cement-factor van 0,7 en 0,8 nog toereikend is, werden vooraf aan het uitgebreide proefprogramma reeds enkele proeven uitgevoerd. Er werden drukproeven gedaan op kubussen met zijde 158 mm (zie paragraaf 4.1.1 voor de beschrijving van deze proef) op een ouderdom van 29⁵ dagen. Van de water/cement-factoren 0,496⁶; 0,6; 0,7 en 0,8 werden telkens 4 proefstukken gemaakt. Figuur 10 geeft de resultaten weer. Hier valt direct de afwijking op ten opzichte van de gemiddelde waarden.



Figuur 10: Druksterkte voor verschillende water/cement-factoren, ouderdom 29 dagen

De sterktes op 29 dagen ouderdom bedragen allen minstens 82,5% van de maximale waarde voor een water/cement-factor 0,6. Bovendien is er geen opvallende afname bij de overgang van 0,7 naar 0,8. Meer nog, de sterkte lijkt terug toe te nemen. Op basis van deze resultaten kan men concluderen dat verder onderzoek voor de water/cement-factoren 0,7 en 0,8 zeker zinvol is. Voor alle gegevens wordt verwezen naar Bijlage B.

3.2.3 Bekisting

De bekisting van het zand-cementmateriaal gebeurt aan de hand van stalen bekistings-mallen. Deze kunnen uit elkaar gevezen worden om de kans op breuk bij het ontkisten beperkt te houden. De mallen dienen vóór het vullen met zand-cement eerst proper gemaakt te worden en worden vervolgens ingevet met een olie om het ontkisten gemakkelijker te laten verlopen.

De stalen mallen die gebruikt worden zijn kubussen met zijde 158 mm, cilinders met diameter 150 mm en hoogte 300 mm, grote prisma's met afmetingen 600x150x150 mm³ (zowel liggend als staand) en

⁵ Om praktische redenen en omdat enkel de vergelijking van belang is, is afgeweken van de standaardwaarde van 28 dagen.

⁶ Wegens een (kleine, echter achteraf opgemeten) fout bij de weging, verschilt deze waarde lichtjes van de meer logische 0,5.

kleine prisma's met afmetingen $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$. Van elke variant worden er 3 exemplaren gemaakt per ouderdom waarop ze getest worden. Standaard wordt een proef uitgevoerd op 1, 2, 3, 7, 14, 28 en 56 dagen.

Het beperkte aantal bekistingsmallen, de maximale hoeveelheid van 200 liter in de menginstallatie én de onmogelijkheid om een té groot aantal proeven op één dag uit te voeren, heeft ertoe geleid om elke samenstelling op twee verschillende dagen te maken.

3.2.4 Verdichting

Het gebruik van een trilnaald is niet mogelijk. De trilnaald verwijdert bij een vers betonmengsel de ingesloten lucht. Het zand-cementmateriaal is echter te poreus om dat toe te laten. De lucht zou aanwezig blijven. Bovendien zou de trilnaald in het zand-cementmateriaal een holte achterlaten als ze er weer uitgehaald wordt. Daarom moet men anders verdichten.

In eerste instantie gebeurde dit met gewichten van 5kg (2 foto's links op Figuur 11). Wegens de lastige verdichting voor de grotere proefstukken en de onnauwkeurigheid die sowieso aanwezig is, werd voor de eenvoud voor de rechthoekige vormen een verdichtingsinstrument gebruikt zoals het tweede van rechts op Figuur 11. Elke laag met een dikte van ongeveer 5cm wordt aangestampt vooraleer nieuw materiaal toe te voegen. Uiterst rechts staat de verdichtingsstaaf die gebruikt wordt voor de kleine prisma's $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$.



Figuur 11: Verdichtingsgewichten van 5kg (links) en verdichtingsstaven (rechts)

Deze wijze van verdichten zorgt er voor dat het sterk persoonsafhankelijk is. Er werd alles aan gedaan om de verdichting zo uniform mogelijk te houden.

3.2.5 Bewaring

De proefstukken worden vanaf de vervaardiging tot aan de beproeving bewaard in een geacclimatiseerde ruimte in het laboratorium Magnel. De bewaringsomstandigheden zijn hier $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ en $(60 \pm 5)\%$ relatieve vochtigheid. De proefstukken worden na 1 dag ontkist.

3.3 Opsplitsing

In wat volgt worden de proeven in verschillende hoofdstukken onderverdeeld. Eerst wordt de invloed van de water/cement-factor op de mechanische eigenschappen bekeken. De proeven die hier besproken worden, zijn standaardproeven die duidelijk in de normen beschreven staan. Deze proeven worden ook behandeld in de thesis van Mattias en in de thesis van Pieter en Kevin van de Hogeschool Gent, telkens voor andere samenstellingen.

Afhankelijk van de eerste ondervindingen zijn er nog extra proeven opgestart die sommige aspecten nader onderzoeken. Zo werden het vochtgehalte, de proctordichtheid en de afschuifsterkte onderzocht.

Tenslotte worden in Hoofdstuk 6 de proeven behandeld betreffende het tweede deel van deze thesis, namelijk het hechtingsgedrag. Hierbij wordt gekeken naar het hechtingsgedrag (met een kracht zowel loodrecht op als evenwijdig met het contactoppervlak) van zand-cement op beton en een gelijmde tegel op zand-cement.

Hoofdstuk 4

Invloed van de water/cement-factor op de mechanische eigenschappen

4.1 Drukproef

4.1.1 Proefmethode

Deze proef verloopt volgens NBN EN 12390-3.[35] De drukproef wordt uitgevoerd op kubussen met een zijde van 158mm. Uiteraard is dit slechts de nominale afmeting en dus dient met een schuifmaat de effectieve waarde bepaald te worden. Men meet deze op 3 verschillende plaatsen in zowel lengte, breedte als hoogte. Ook het gewicht van de kubussen wordt bepaald.

De hoogte wordt op voorhand zo bepaald dat het afstrijkvlak één van de opstaande zijden is. De bekistingsvlakken zijn meer effen en bijgevolg beter geschikt om als boven- of ondervlak te gebruiken in de drukpers. Door de ruwheid van het afstrijkvlak zouden de platen van de machine op een kleiner gedeelte van het oppervlak hun kracht kunnen uitoefenen wat een vertekend beeld kan geven.

De drukproef zelf wordt afhankelijk van de ouderdom (en bijhorende sterkte) uitgevoerd op een kleinere of grotere drukpers. De kleine pers wordt handmatig bediend.



Figuur 12: Kleine pers (tot 200kN) en grote pers voor drukproeven

Na plaatsing van het proefstuk op de plaat, wordt de druk op het proefstuk aan een langzame constante snelheid opgevoerd tot het proefstuk gebroken is. Deze snelheid is lager (afhankelijk van de ouderdom) dan de in de norm opgegeven waarde van 0,6 MPa/s omdat het proefstuk anders te rap zou breken. De machines registreren de maximale drukkracht tijdens dit proces.

De sterkte kan op de kleine drukpers oplopen tot 200kN. Voor zand-cement wordt ze gebruikt voor de proefstukken die 1 en 2 dagen oud zijn. Oudere proefstukken kunnen reeds met een grotere drukpers (rechts op Figuur 12) beproefd worden welke ongeschikt is voor te jonge proefstukken die slechts een beperkte drukkracht kunnen weerstaan.

4.1.2 Resultaten

De druksterkte wordt uitgedrukt in N/mm² en wordt gegeven door onderstaande formule.

$$f_{ccub158} = \frac{P}{b * l}$$

Met $f_{ccub158}$ = de druksterkte van kubussen met nominale zijde 158 mm [N/mm²]

P = de kracht waarbij het proefstuk bezwijkt [N]

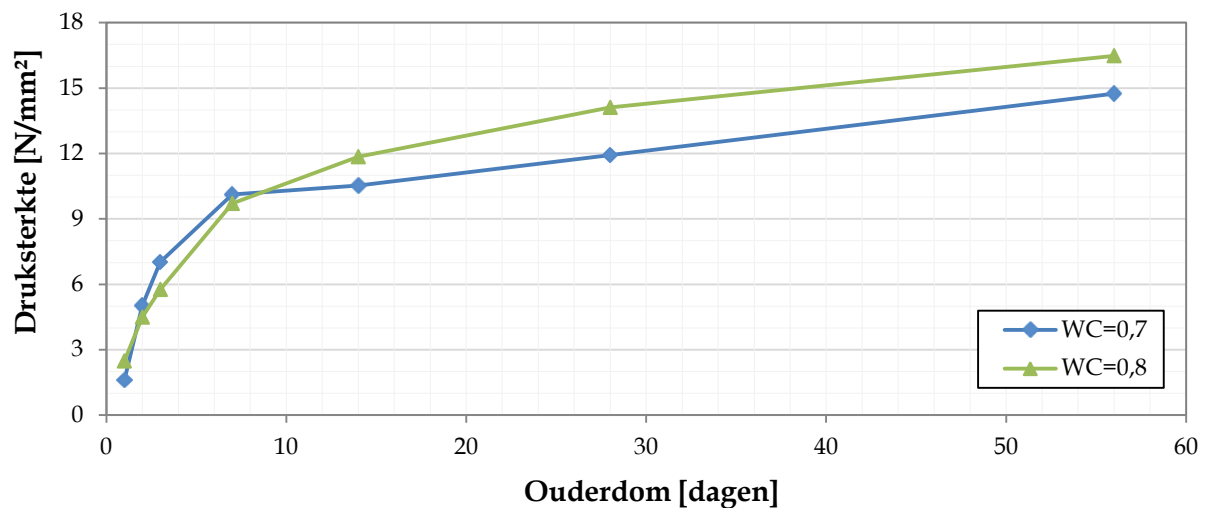
b en l = respectievelijk de gemiddelde breedte en lengte van het proefstuk [mm]

Onderstaande tabel geeft de gemiddelde druksterktes en de variatiecoëfficiënt voor de beide onderzochte samenstellingen.

Tabel 18: Druksterktes [N/mm²] van kubussen met zijde 158mm

Ouderdom [dagen]	W/C=0,7		W/C=0,8	
	Druksterkte [N/mm ²]	c_v	Druksterkte [N/mm ²]	c_v
1	1,61	0,052	2,48	0,047
2	5,03	0,052	4,50	0,023
3	7,02	0,058	5,76	0,033
7	10,12	0,037	9,71	0,072
14	10,53	0,058	11,85	0,059
28	11,92	0,074	14,11	0,029
56	14,74	0,023	16,48	0,075

Als de sterkte op 28 dagen vergeleken wordt met de vermelde eisen volgens NEN 2741 in Tabel 3, dan kan er het volgende geconcludeerd worden. Er wordt van uitgegaan dat de sterkte in het laboratorium deze in het werk evenaart (wat meestal niet het geval zal zijn). Beide samenstellingen zijn toepasbaar voor elk type dekvloer in de woningbouw. Voor W/C=0,7 wordt net niet en voor W/C=0,8 wel voldaan aan de eis voor een hechtende dekvloer in de utiliteitsbouw. Geen van beide kan gebruikt worden voor een niet-hechtende dekvloer in de utiliteitsbouw.



Figuur 13: Verloop van de kubusdruksterkte in functie van de tijd

Net als bij beton is er een felle stijging op jonge ouderdom te zien. De helling van de curve neemt af naar het einde toe. Na vergelijking van de resultaten voor water/cement-factoren 0,7 en 0,8 lijkt hier geen eenduidige conclusie mogelijk over welk van de twee samenstellingen het sterkste is. Op jongere ouderdom lijken de proefstukken met $W/C=0,7$ sterker te zijn, maar voor de oudere proefstukken halen deze met $W/C=0,8$ een hogere sterkte. Bijlage C bevat alle resultaten van de drukproef.

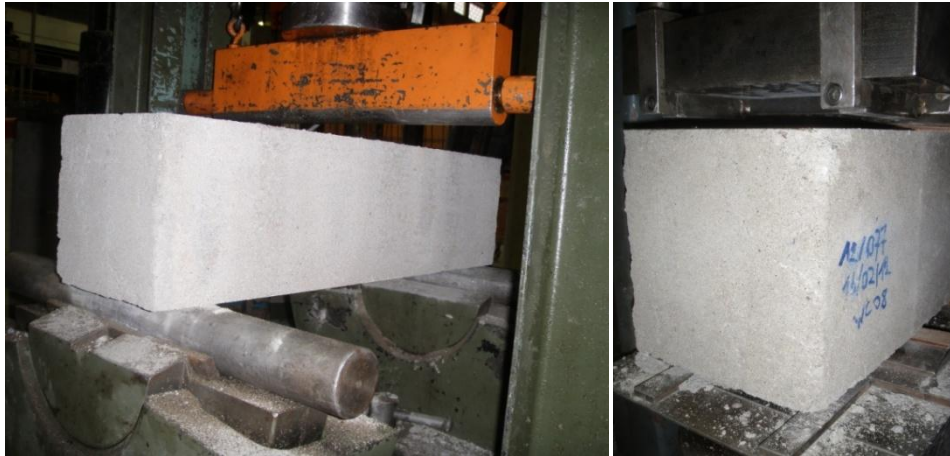
4.2 Buig- en slijtproef

4.2.1 Proefmethode

De proefmethode is gebaseerd op de normen NBN EN 12390-5 en NBN EN 12390-6. [35] Voor de buig- en slijtproef werden liggende prisma's vervaardigd met afmetingen $600 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$. Men voert de buig- en slijtproef uit omdat een zuivere trekproef moeilijker uit te voeren is. De resultaten die men bekomt met beide proeven geven elk een eigen interpretatie van de treksterkte, maar zijn alle twee hoger dan de zuivere treksterkte.

De grote prisma's worden eerst aan een driepuntsbuigproef onderworpen (links op Figuur 14). Het proefstuk wordt centraal geplaatst op de twee steunpunten waarna men met een handmatig bediende pers de druk op het midden van het prisma opvoert tot breuk optreedt. De tussenafstand tussen deze steunpunten bedraagt 500 mm.

Met de twee aldus bekomen helften voert men dan een slijtproef (rechts op Figuur 14) uit. Ook hier verloopt het proces door middel van een manuele bediening. Bij beide proeven dient men de toename zo geleidelijk en uniform mogelijk te laten geschieden. Voor de slijtproef wordt de prismahelft op ongeveer $1/3$ van de halve lengte, gemeten vanaf het niet-gebroken eindvlak, belast door middel van twee tegenover elkaar gelegen lijnlasten die haaks verlopen op de langsas van het proefstuk.



Figuur 14: Buig- en splijtproof op prisma's

4.2.2 Resultaten

Uit deze proef kan enerzijds de buigtreksterkte en anderzijds de splijttreksterkte afgeleid worden. Beide sterktes worden uitgedrukt in N/mm².

De buigtreksterkte wordt gegeven door de maximale spanning in de onderste vezel van het prisma omdat de trekspanning daar maximaal is. Bovenaan zal er drukspanning optreden. De buigtreksterkte of dus de maximale spanning ten gevolge van het buigmoment kan als volgt berekend worden.

$$\sigma_{ondervezel} = \frac{M * y}{I}$$

Met M = het moment in het midden van de overspanning [N/mm²]
 y = de afstand van de neutrale vezel tot de plaats waar men de spanning wil kennen, in dit geval is dit de halve hoogte aangezien de trekspanning aan de ondervezel maximaal zal zijn ten gevolge van de buigproef [mm]
 I = het traagheidsmoment van de doorsnede [mm⁴]

Of dus

$$f_{buig_{600}} = \frac{1,5 * P * L}{b * h^2}$$

Met $f_{buig_{600}}$ = de buigtreksterkte van een prisma 600x150x150 mm³ [N/mm²]
 P = de kracht waarbij het proefstuk bezwijkt [N]
 L = de tussenafstand tussen de twee opleggingen [mm]
 b en h = de breedte en hoogte van het breukvlak [mm]

De splijttreksterkte wordt gegeven door onderstaande formule [36].

$$f_{splijt} = \frac{2 * P}{\pi * b * h}$$

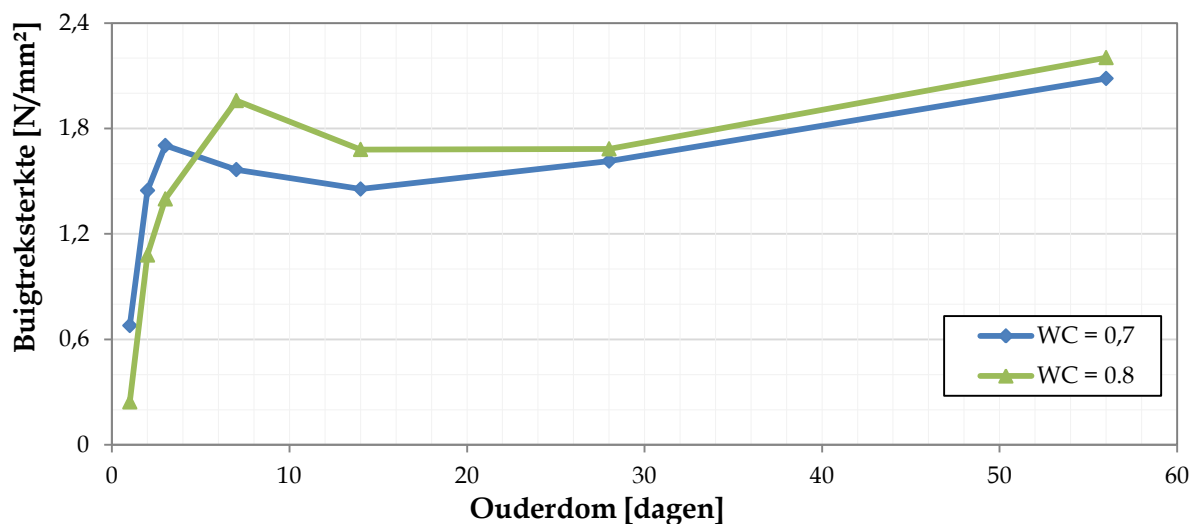
Met f_{splijt} = de splijttreksterkte [N/mm²]
 P = de kracht waarbij het proefstuk bezwijkt [N]
 b en h = de breedte en hoogte van het breukvlak [mm]

Onderstaande tabellen en figuren geven de gemiddelde buig- en splijttreksterktes en de bijhorende variatiecoëfficiënt voor de beide onderzochte samenstellingen.

Tabel 19: Buigtreksterktes [N/mm²] van prisma's 600x150x150 mm³

Ouderdom [dagen]	W/C=0,7		W/C=0,8	
	Buigtreksterkte [N/mm ²]	c_v	Buigtreksterkte [N/mm ²]	c_v
1	0,68	0,032	0,24	0,016
2	1,45	0,024	1,08	0,020
3	1,70	0,024	1,40	0,010
7	1,57	0,032	1,96	0,012
14	1,46	0,067	1,68	0,138
28	1,61	0,082	1,68	0,041
56	2,08	0,034	2,20	0,111

Vergelijkt men de waarden op 28 dagen met de eisen vermeld in Tabel 3 voor zwevende dekvloeren, dan kan men stellen dat de buigtreksterkte in de vereiste categorie F_w1 tot F_w7 zit.



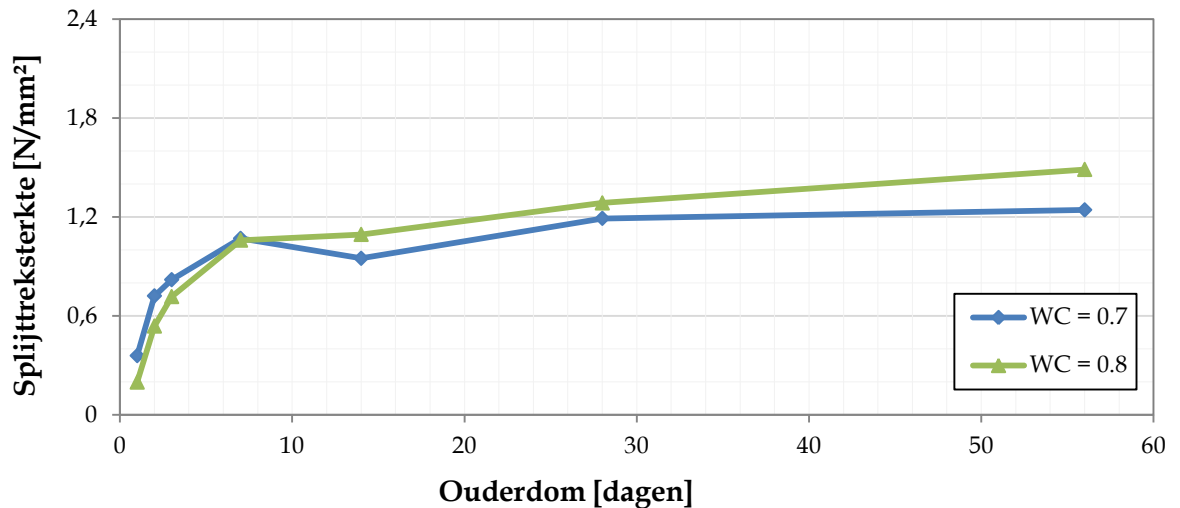
Figuur 15: Verloop van de buigtreksterkte (prisma's 600x150x150 mm³) in functie van de tijd

Figuur 15 geeft de buigtreksterkte grafisch weer. Ook hier valt een grotere sterkte op voor de mengsels met W/C=0,7 op jonge ouderdom en voor mengsels met W/C=0,8 voor oudere proefstukken. Wat nu duidelijk te zien is, is de tijdelijke terugval in sterkte op een zeker tijdstip.

Tabel 20: Splijttreksterktes [N/mm²] van prisma's 600x150x150 mm³

Ouderdom [dagen]	W/C=0,7		W/C=0,8	
	Splijttreksterkte [N/mm ²]	c_v	Splijttreksterkte [N/mm ²]	c_v
1	0,36	0,120	0,20	0,113
2	0,72	0,149	0,54	0,062
3	0,82	0,070	0,72	0,053
7	1,07	0,078	1,06	0,088
14	0,95	0,067	1,09	0,049
28	1,19	0,151	1,29	0,094
56	1,24	0,133	1,49	0,117

De terugval in sterkte is veel minder opvallend bij de splijttreksterkte dan bij de buigtreksterkte. De splijttreksterktes zijn voor $W/C=0,7$ hoger op jongere leeftijd en voor $W/C=0,8$ op oudere leeftijd. De splijttreksterktes zijn over het algemeen lager dan de buigtreksterktes. Dit heeft te maken met het feit dat de hele doorsnede in trek komt tijdens de splijtproef, waar bij de buigproef vooral de onderste vezels in trek komen. Er is bij de splijtproef aldus een grotere kans op een zwakker deel in de beproefde zone wat snellere breuk tot gevolg heeft. Bijlage D geeft de uitgebreide resultatenfiches van de buig- en splijtproef.



Figuur 16: Splijttreksterktes van de helften van prisma's $600 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ in functie van de ouderdom

4.3 Buig- en drukproef

4.3.1 Proefmethode

De kleinere liggende prisma's $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ worden beproefd met een ander toestel dan de grote prisma's. De proefmethode verloopt volgens de norm NBN EN 13892-2.[30] Eerst worden afmetingen en gewicht bepaald van de proefstukken zodat het volumegewicht gekend is. Voor de buigtreksterkte (driepuntsbuigproef) worden ze vervolgens symmetrisch ten opzichte van het midden geplaatst op twee steunpunten die 100 mm van elkaar gelegen zijn.



Figuur 17: Buig- en drukproef op kleine prisma's

Centraal op het bovenzvlak van het proefstuk wordt de druk langzaam opgevoerd tot het prisma breekt. De twee helften van dit prisma worden vervolgens gebruikt om een drukproef op uit te voeren met een kleine drukpers waarvan de drukplaten een oppervlakte hebben van 40x40 mm². De halve prisma's worden zo geplaatst dat ze met hun bekistingsvlak 16mm verder komen dan deze drukplaten.

De belastingssnelheid ligt voor beide proeven lager dan de in de norm opgegeven waarde omdat de uiteindelijk te verwachten kracht in het algemeen voor zand-cement ook lager is dan deze voor mortelprisma's op 28 dagen ouderdom.

4.3.2 Resultaten

Uit deze proef kan enerzijds de buigtreksterkte en anderzijds de druksterkte afgeleid worden. Beide sterktes worden uitgedrukt in N/mm². Buigtreksterkte en druksterkte zijn reeds besproken. De proefstukken hebben hier echter andere afmetingen. Daarom krijgen de sterktes een andere naam. Het principe is uiteraard in beide gevallen volledig gelijkaardig en wordt hierom niet meer besproken.

$$f_{buig_{160}} = \frac{1,5 * P * L}{b * h^2}$$

Met $f_{buig_{160}}$ = de buigtreksterkte van een prisma 160x40x40mm³ [N/mm²]

P = de kracht waarbij het proefstuk bezwijkt [N]

L = de tussenafstand tussen de twee opleggingen [mm]

b en h = de breedte en hoogte van het breukvlak [mm]

$$f_{cpr} = \frac{P}{\min(b; 40) * 40}$$

Met f_{cpr} = de druksterkte van prismahelften [N/mm²]

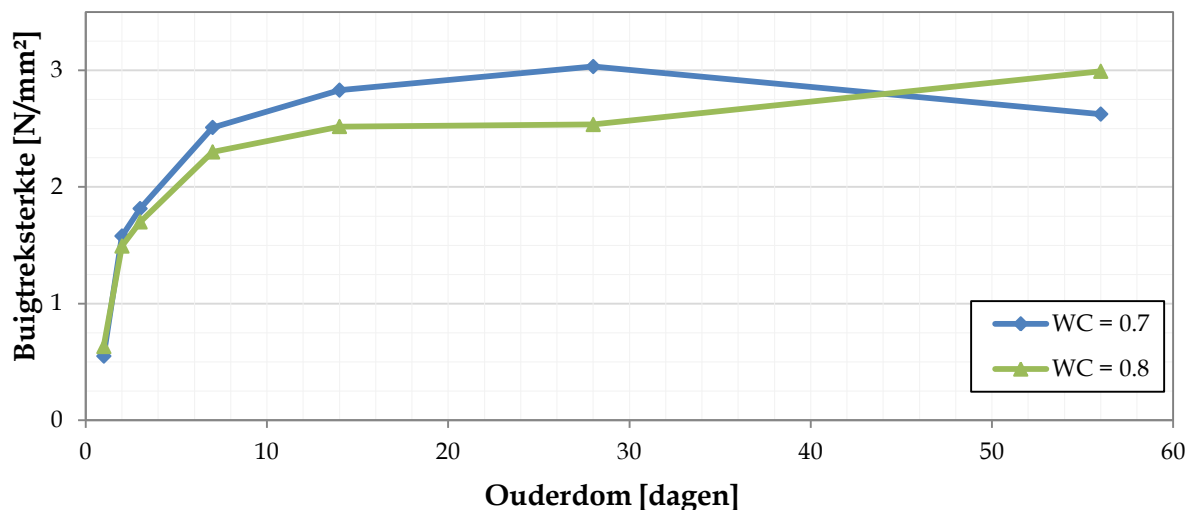
P = de kracht waarbij het proefstuk bezwijkt [N]

b = breedte [mm]

De afmetingen worden beperkt tot 40 mm omdat de drukkracht gerealiseerd wordt via (en het proefstuk opgelegd wordt op) een vierkant oppervlak met zijde 40 mm. Uiteraard kan de breedte kleiner zijn dan 40 mm, vandaar dat er gekeken wordt naar het minimum. Onderstaande tabellen en figuren geven de gemiddelde buig- en druksterktes en de bijhorende variatiecoëfficiënt voor de beide onderzochte samenstellingen.

Tabel 21: Buigtreksterktes [N/mm²] van prisma's 160x40x40 mm³

Ouderdom [dagen]	W/C=0,7		W/C=0,8	
	Buigtreksterkte [N/mm ²]	c_v	Buigtreksterkte [N/mm ²]	c_v
1	0,55	0,056	0,63	0,039
2	1,58	0,087	1,49	0,066
3	1,81	0,015	1,70	0,052
7	2,51	0,044	2,30	0,061
14	2,83	0,083	2,52	0,057
28	3,03	0,105	2,54	0,045
56	2,62	0,110	2,99	0,049



Figuur 18: Verloop van de buigtreksterkte (prisma's 160x40x40 mm³) in functie van de tijd

Wat tot nu toe altijd geconcludeerd kon worden betreffende de sterkteverschillen tussen de beide water/cement-factoren van jonge en oude leeftijd, is hier niet geldig. De proefstukken met $W/C=0,8$ zijn ditmaal sterker op 1 dag ouderdom én op 56 dagen ouderdom. Tussentijd zijn ze zwakker dan die met $W/C=0,7$. Er is uiteraard ook een verschil met de buigtreksterktes van de grote prisma's. De waarden liggen voor de kleinere prisma's over het algemeen beschouwd een fractie hoger.

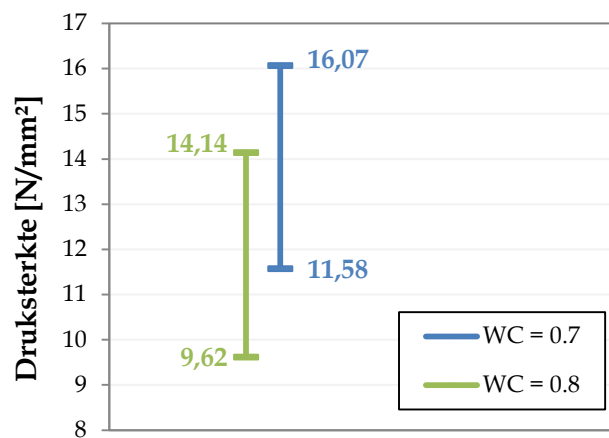
Als deze proeven gebruikt zouden worden ter vergelijking met de eisen van Tabel 3, dan kan men concluderen dat de eis van de buigtreksterkte voor zwevende dekvloeren gehaald wordt. Wat de druksterkte betreft, wordt enkel voldaan aan de eisen van de woningbouw (en niet van de utiliteitsbouw) en dit voor zowel hechtende als niet-hechtende dekvloeren.

Tabel 22: Druksterktes [N/mm²] van helften van prisma's 160x40x40 mm³

Ouderdom [dagen]	W/C=0,7		W/C=0,8	
	Druksterkte [N/mm²]	c_v	Druksterkte [N/mm²]	c_v
1	1,81	0,125	2,00	0,091
2	5,98	0,027	5,07	0,027
3	7,14	0,031	6,87	0,023
7	11,94	0,098	11,00	0,055
14	10,71	0,061	11,15	0,073
28	11,34	0,065	11,18	0,106
56	13,74	0,116	12,25	0,142

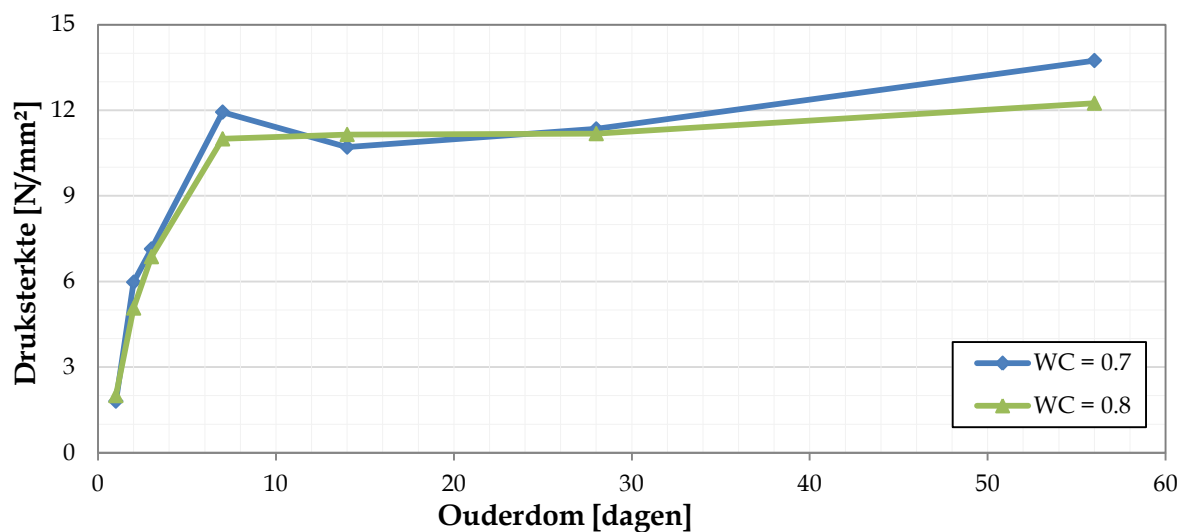
Waar de waarden voor kleine prisma's bij buigtreksterkte nog hoger liggen, zullen de druksterktes ongeveer overeenkomen met deze van de kubussen. De grafieken voor beide water/cement-factoren lopen door elkaar zodat men moeilijk kan zeggen welke van de twee de hoogste sterkte halen. Na 56 dagen lijkt $W/C=0,7$ duidelijk sterker te zijn, maar onderstaande figuur toont dat deze conclusie met een stevige korrel zout genomen dient te worden. De spreiding van beide water/cement-factoren wordt weergegeven door het aanduiden van de minimale en maximale druksterkte op 56 dagen ouderdom. Het is dus duidelijk dat deze waarden mooi in elkaar overlopen en dat er enkel sprake kan zijn van lagere uitersten voor $W/C=0,8$ en hogere uitersten voor $W/C=0,7$. Deze spreiding is er voor alle proeven en ouderdommen, al is deze nooit zo uitgesproken als hier. Meestal liggen de maxima

van de laagste van beide gemiddelde waarden (voor dezelfde ouderdom) onder de minima van de hoogste.



Figuur 19: Druksterkte op 56 dagen ouderdom van de prismahelften $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ met aanduiding van maximale en minimale waarden voor beide W/C's

Figuur 20 toont grafisch de gemiddelde waarden, waarbij de sprong op 56 dagen wegens voorgaande verklaring iets minder de aandacht zou mogen trekken dan nu het geval is.



Figuur 20: Druksterktes van helften van prisma's ($160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$) in functie van de tijd

Bijlage E bevat alle waarden van de buig- en drukproef op kleine prisma's.

4.4 Stijfheidsontwikkeling

4.4.1 Proefmethode

NBN B 15-203 beschrijft de proefmethode. [37] Het doel van de proef is om de E-modulus te kunnen bepalen. Men gebruikt cilinders met diameter 150 mm en hoogte 300 mm om de proeven op uit te voeren. De rekstrookjes worden met behulp van een tweecomponentenlijm X60 bevestigd op de

cilinders. Aan deze rekstrookjes worden soldeereilandjes bevestigd. Hieraan kunnen de sensoren gesoldeerd worden om de rek te registreren met de computer.

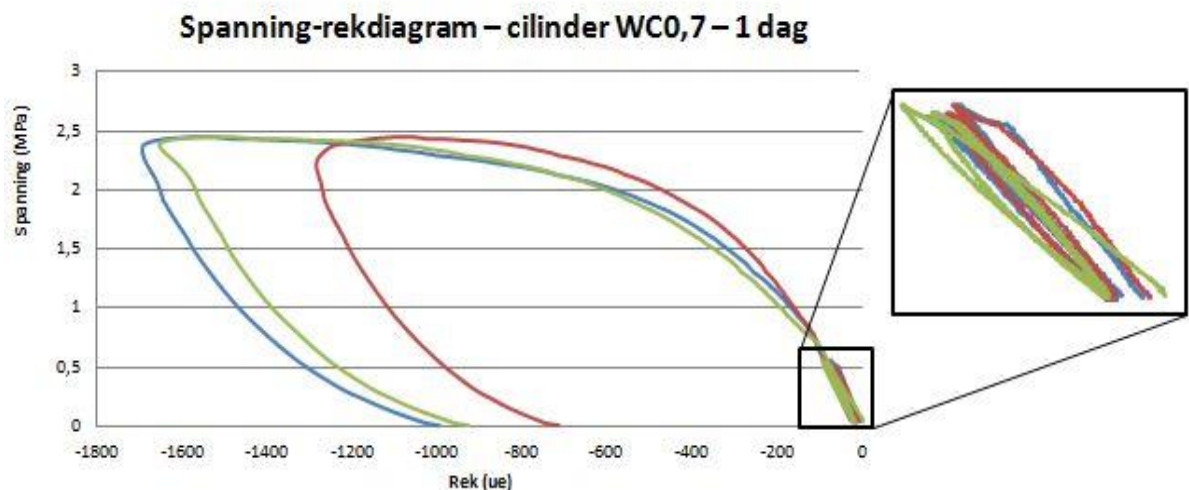


Figuur 21: Voorbereiding en proefopstelling voor de bepaling van de E-modulus

De dikte van deze lijmlaag moet voldoende zijn, maar mag echter niet té dik zijn omdat de rekstrookjes de beweging van de cilinder niet meer zouden volgen in dat geval. Per cilinder worden er 3 rekstrookjes gekleefd met tusselhoek van 120° in bovenaanzicht. Ze worden allen verticaal geplaatst op gelijke afstand van boven- en ondervlak en met dezelfde oriëntering van de soldeereilandjes.

De cilinder wordt in de handmatige drukpers met capaciteit 200kN geplaatst. Men gebruikt hier wederom deze drukpers omwille van zijn nauwkeurigheid voor kleinere sterktes. Ter bepaling van de E-modulus dient er namelijk eerst enkele malen een belasting te gebeuren tot een waarde die ongeveer $1/3^e$ van de uiteindelijke druksterkte bedraagt waarna men telkens weer ontlast. Dit gebeurt bij voorkeur aan een gelijkmatig tempo, al is dit met een handmatige drukpers niet altijd perfect uit te voeren. Er wordt getracht om het toenemen, het afnemen en het constant houden van de sterkte 1,5 minuut te laten duren. Er wordt drie keer belast en ontlast. Daarna wordt de druk opgevoerd tot het proefstuk breekt zodat de cilinderdruksterkte van het materiaal gekend is.

Met een computer worden de vervormingen van de 3 rekstroken en de kracht uitgeoefend door de drukpers geregistreerd tijdens de proef. Uit de kracht kan de drukspanning in de cilinder berekend worden en als resultaat wordt bijvoorbeeld Figuur 22 verkregen voor een cilinder met water/cement-factor 0,7 op 1 dag ouderdom.



Figuur 22: Diagram van een proef ter bepaling van de E-modulus

De drie curven op deze grafiek zijn van de drie verschillende rekstrookjes. Hier lopen deze redelijk gelijk, maar vaak gebeurt het dat er één van de rekstroken een steilere of plattere curve vertoont. Dat verklaart de grote variatiecoëfficiënten.

Een verklaring hiervoor kan het feit zijn dat boven- en ondervlak van de cilinder niet mooi glad geslepen werden zoals dit voor betoncylinders wel het geval is bij deze proef. Het zand-cement is te zwak om dit egaal slijpen van beide vlakken toe te laten. Door deze onnauwkeurigheden die niet weggewerkt worden, kan het zijn dat het proefstuk niet perfect centrisch belast wordt. Dit heeft dan uiteraard uiteenlopende curves tot gevolg. Het niet gebruik maken van de hele oppervlakte heeft mogelijks lagere druksterktes tot gevolg. De enige maatregel die hier genomen kan worden is bij het maken van de proefstukken het afstrijkvlak zo goed mogelijk vlak te maken.

4.4.2 Resultaten

De secans-elasticiteitsmodulus wordt berekend door de helling te beschouwen van de spanning/vervorming-grafiek die verkregen wordt door bovenstaande proefmethode. Er wordt telkens gekeken naar de opgaande tak van de curve. Er worden 3 belastingscycli uitgevoerd omdat de curven dan voldoende dicht bij elkaar gelegen zijn. De uiteindelijke waarde wordt dan gegeven door onderstaande formule. [36]

$$E_{cm} = \frac{\sigma_{c2} - \sigma_{c1}}{\epsilon_{c2} - \epsilon_{c1}}$$

Met E_{cm} = secans-elasticiteitsmodulus [N/mm²]
 σ_{c2} = 1/3 van de druksterkte van de cilinder [N/mm²]
 σ_{c1} = 0,5 [N/mm²]
 ϵ_{ci} = de vervorming overeenstemmende met σ_{ci} (i=1,2) [-]

Voor proefstukken die 1 dag oud zijn, wordt voor σ_{c1} een waarde van 0,05 N/mm² genomen. De waarde van σ_{c2} bedraagt voor deze proefstukken 0,5 N/mm². Zo bekijkt men ook voor deze proefstukken het lineair gedeelte van de curven.

Naast de E-modulus wordt eveneens de druksterkte bepaald.

$$f_{ccil} = \frac{P}{A}$$

Met f_{ccil} = de druksterkte van cilinders met diameter 150mm en hoogte 300mm [N/mm²]

P = de kracht waarbij het proefstuk bezwijkt [N]

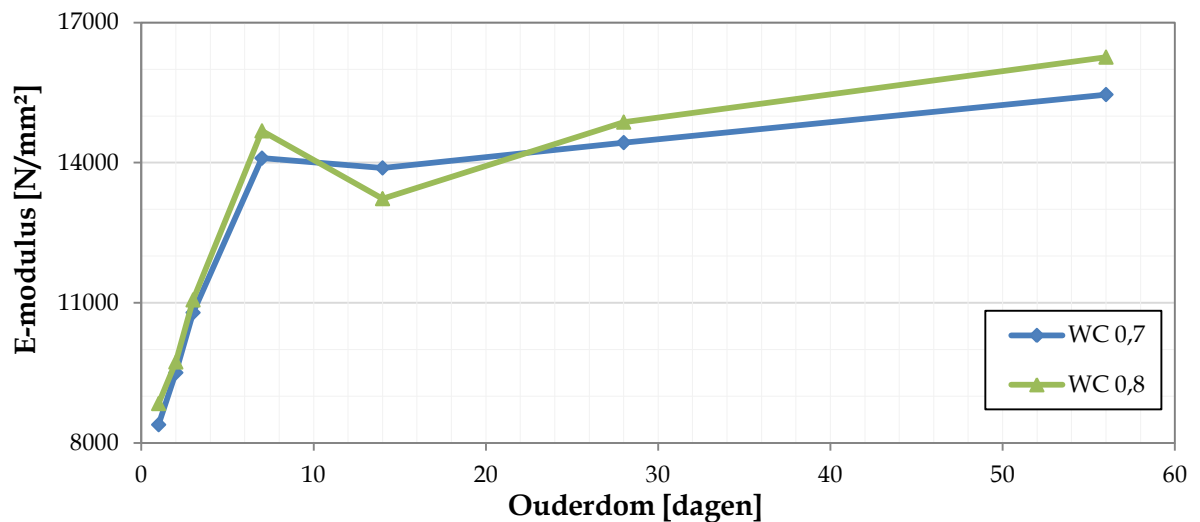
A = de doorsnede van het cilinderoppervlak [mm²]⁷

Onderstaande tabellen en grafieken geven de waarden voor E-modulus en druksterkte.

Tabel 23: E-moduli [N/mm²] bepaald met cilinders met diameter 150mm, hoogte 300mm

Ouderdom [dagen]	W/C=0,7		W/C=0,8	
	E-modulus [N/mm ²]	c_v	E-modulus [N/mm ²]	c_v
1	8392,69	0,119	8845,21	0,241
2	9506,33	0,096	9735,58	0,123
3	10791,07	0,105	11063,89	0,102
7	14097,71	0,119	14680,89	0,195
14	13887,84	0,200	13231,09	0,102
28	14430,29	0,126	14868,79	0,273
56	15458,98	0,181	16259,79	0,207

Met uitzondering van het dal op 14 dagen ouderdom, liggen de gemiddelde waarden van W/C=0,8 allen hoger dan deze van W/C=0,7. Net als voor de tijdsevolutie bij de eerder besproken sterktes valt het op dat de stijfheid op jonge ouderdom enorm stijgt waarna er een langzamere toename van de E-modulus volgt voor oudere proefstukken.



Figuur 23: E-modulus in functie van de ouderdom bepaald met cilinders met diameter 150 mm, hoogte 300 mm

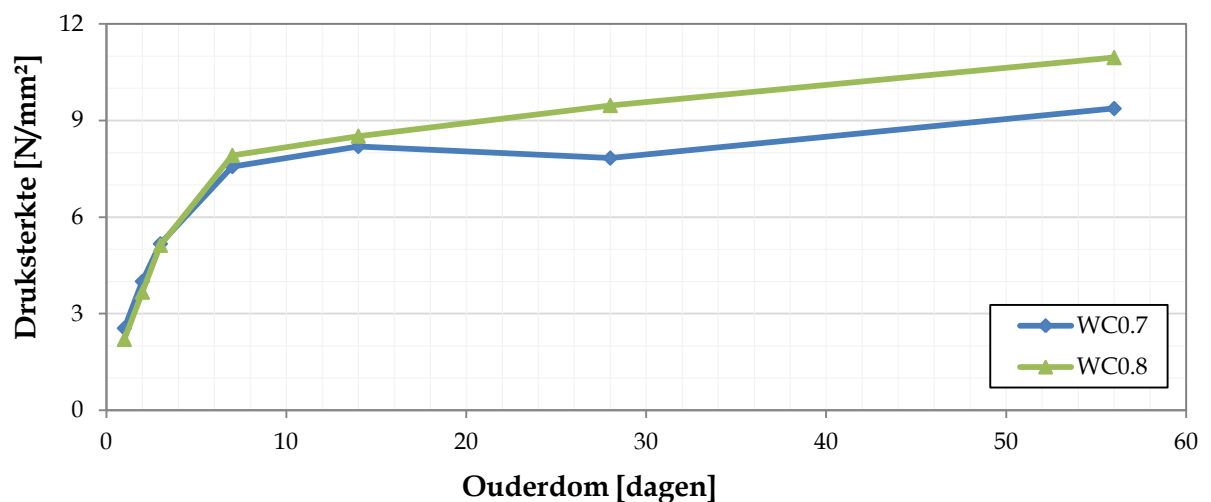
Deze waarden zijn niet verkregen door een standaarddrukproef, waar dit wel het geval is bij het bepalen van de andere druksterktes. De proefstukken worden hier namelijk eerst drie keer voorbelast.

⁷ De doorsnede is voor elk proefstuk gelijk genomen aan de nominale doorsnede, zijnde 17671,46 mm²

Dit kan een invloed hebben op de druksterkte. Ook de ruwheid van het afstrijkvlak als boven- of ondervlak speelt mee. Bij de andere proefstukken wordt dit afstrijkvlak verticaal geplaatst.

Tabel 24: Druksterktes [N/mm²] van cilinders met diameter 150mm, hoogte 300mm

Ouderdom [dagen]	W/C=0,7		W/C=0,8	
	Druksterkte [N/mm ²]	c_v	Druksterkte [N/mm ²]	c_v
1	2,55	0,084	2,20	0,058
2	4,00	0,061	3,67	0,136
3	5,17	0,090	5,13	0,043
7	7,57	0,029	7,92	0,007
14	8,20	0,055	8,52	0,071
28	7,83	0,088	9,47	0,067
56	9,37	0,150	10,95	0,014



Figuur 24: Het verloop van de druksterkte van cilinders (diameter 150 mm, hoogte 300 mm) ifv de tijd

De proefstukken met W/C=0,7 zijn sterker tot en met 3 dagen ouderdom, waarna deze met W/C=0,8 de bovenhand nemen. Het lijkt een terugkerend fenomeen te zijn voor de meeste proeven. De druksterktes liggen hier lager dan deze van de kubussen en de kleine prismahelften. Dit heeft vooral te maken met de eerder vermelde ruwheid van het afstrijkvlak en het voorbelasten maar ook het vormeffect speelt mee (dit wordt besproken in paragraaf 7.4). Bijlage F vermeldt de bekomen waarden voor elk rekstrookje en de drukkracht van elke cilinder van deze proef.

4.5 Krimp

4.5.1 Proefmethode

Ter bepaling van de krimp worden op enkele staande prisma's met dimensies 150x150x600 mm³ op de vier zijden met de tweecomponentenlijm X60 twee meetpunten bevestigd. Met behulp van een Demec-meettoestel wordt elke dag de tussenafstand tussen deze meetpunten bepaald. Er werden in de geacclimatiseerde ruimte op 20°C en 60% RV 3 prisma's per samenstelling bewaard en in de

geacclimatiseerde ruimte op 20°C en met een RV van minstens 95% werden er 2 bewaard van elke samenstelling.



Figuur 25: Meting van de krimp met het Demectoestel

4.5.2 Resultaten

De krimp op een bepaald tijdstip wordt gegeven door volgende formule.

$$\epsilon_{cs}(t) = \frac{(u_0 - u_t)}{1000000}$$

Met $\epsilon_{cs}(t)$ de krimp op tijdstip t [-]

u_0 en u_t de afleeswaarden van het Demec-toestel op tijdstippen 0 en t [-]

Het is vooral de uitdrogingskrimp⁸ die bepalend zal zijn voor het inkorten van het prisma. Deze krimp wordt veroorzaakt doordat het water in het proefstuk verdampt als het niet in een met water verzadigde omgeving geplaatst is. Eerst zal het water dat zich vrij in de capillairen bevindt, verdampen. Daarna zal het fysisch gebonden gelwater uit het proefstuk verdwijnen door inwendige verschillen in relatieve vochtigheid. Theoretisch kan voor beton een waarde afgeleid worden die de uiteindelijke uitdrogingskrimp geeft in functie van de sterkteklasse van het cement, de sterkte van het beton en de relatieve vochtigheid van de omgeving. [36]

$$\begin{aligned}\epsilon_{cs}(\infty) &= \epsilon_s * \beta_{RV} \\ \epsilon_s &= (160 + \beta_{sc} * (90 - f_{cm})) * 10^{-6} \\ \beta_{RV} &= 1,55 * \left(1 - \left(\frac{RV}{100}\right)^3\right)\end{aligned}$$

Met $\epsilon_{cs}(\infty)$ = de uiteindelijke krimp

ϵ_s = een factor die de beton- en cementsterkte in rekening brengt

β_{sc} = 4 voor een cement van de sterkteklasse 32,5

f_{cm} = gemiddelde cilinderdruksterkte op 28 dagen ouderdom

⁸ De autogene krimp heeft uitwendig nauwelijks meetbare krimpvervorming als gevolg. Er dient enkel rekening mee gehouden te worden als W/C zeer laag is of als het cementgehalte of de sterkte zeer hoog is. Dit is allemaal niet het geval. [36]

β_{RV} = een factor die de invloed van de relatieve vochtigheid in rekening brengt
 RV = de relatieve vochtigheid in de ruimte

Deze formules zijn afgeleid voor beton in plaats van zand-cement. In plaats van de cilinderdruksterkte zal hier de kubusdruksterkte genomen worden en dit omdat de cilinderdruksterkte niet correct bepaald wordt. Uitwerking van deze formule geeft volgende waarden voor de verschillende samenstellingen en bewaringsomstandigheden.

Tabel 25: Theoretische waarden voor de krimpvervorming [-]

	20°C en 60%RV	20°C en 95%RV
W/C = 0,7	0,000574	0,000104
W/C = 0,8	0,000563	0,000102

Vergelijkt men deze waarden met de gemiddelden van de laatst gemeten krimpvervorming, dan is er een vrij goede overeenkomst vast te stellen. De ouderdom waarop deze laatste meting gebeurde is verschillend voor elke soort proefstuk, maar hetzelfde binnen één categorie zodat men het gemiddelde kan beschouwen. De waarden, met de ouderdom waarop de laatste meting gebeurde tussen haakjes, worden gegeven in Tabel 26.

Tabel 26: Gemeten eindwaarden (met ouderdom) voor de krimpvervorming [-]

	20°C en 60%RV	20°C en 95%RV
W/C = 0,7	0,000582 (79 dagen)	0,000227 (73 dagen)
W/C = 0,8	0,000525 (78 dagen)	0,000197 (67 dagen)

Wat vooral van belang is bij vergelijking van de experimentele en theoretische waarden is dat de waarden relatief gezien gelijkaardig zijn. Hiermee wordt bedoeld dat deze van W/C=0,8 lichtjes kleiner zijn dan deze van W/C=0,7. De krimpvervorming van de proefstukken bewaard in de geacclimatiseerde ruimte met 60%RV is een aantal malen groter dan deze in de vochtige (95%RV) ruimte.

De gebruikte theoretische formule bevat voor zand-cement de goede parameters. Meestal denkt men dat de W/C een invloed heeft (wegens de fysische verklaring van uitdrogingskrimp), maar toch is de druksterkte in de formule opgenomen. Voor beton is het uiteraard correct dat bij toenemende W/C de krimp zal toenemen. Dit ziet men in de formule doordat de betonsterkte afneemt voor een stijgende W/C. Voor de zand-cementproefstukken echter blijkt dat de krimp groter is voor een kleinere W/C. Dit hangt samen met de grotere kubusdruksterkte voor W/C=0,8 dan W/C=0,7 op 28 dagen ouderdom. Het is op basis van deze waarde dat de theoretische krimp berekend wordt.

Wat betreft het verschil tussen de krimp in beide geacclimatiseerde ruimtes kan men dezelfde conclusies trekken als voor beton. Hoe hoger de relatieve vochtigheid in de omgeving waar de proefstukken bewaard worden, hoe kleiner de uitdrogingskrimp zal zijn. Het water zal namelijk minder geneigd zijn om het proefstuk te verlaten als de omgeving vochtiger is.

Dat de waarden voor de geacclimatiseerde ruimte met een relatieve vochtigheid van tenminste 95% experimenteel dubbel zo hoog zijn dan de theoretische voor beton, kan te verklaren zijn door de porositeit van het zand-cementmengsel. Waar het in zulke vochtige omgeving meestal moeilijk is voor het vocht om het proefstuk te verlaten, is deze weerstand bij zand-cement deels opgeheven door de grotere porositeit. Er is echter nog een tweede, waarschijnlijk meer belangrijke factor, die meespeelt in het verschil tussen experimentele en theoretische waarden. Bij het berekenen van de experimentele

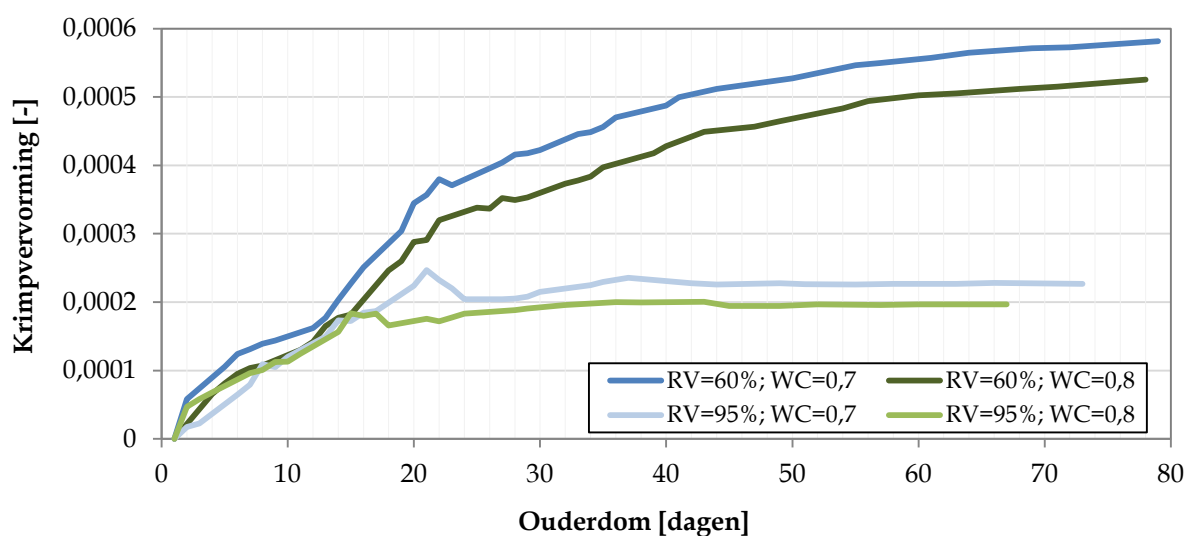
waarden werd uitgegaan van een relatieve vochtigheid die vaststaat op respectievelijk 60 en 95%. In de praktijk blijkt uit metingen echter dat deze laatste waarde zelden gehaald wordt. Onderstaande tabel geeft de percentages van het aantal gemeten waarden die aan de in de tabel vermelde voorwaarden voldoen. Hieruit kan men concluderen dat de relatieve vochtigheid in de geacclimatiseerde ruimte met $RV = 60\%$ voldoet aan de eisen, maar dat de andere ruimte over het algemeen té vaak een lagere relatieve vochtigheid heeft.

Tabel 27: Correctheid van de relatieve vochtigheid in de geacclimatiseerde ruimtes

	20°C en RV 60%		20°C en RV 95%	
	RV < 55%	RV > 65%	RV < 95%	RV < 90%
Hele periode [%]	0,01	0,00	53,69	37,16
22 februari tot 15 maart [%]	nvt	nvt	94,54	70,81

In de beginperiode, wanneer net het meeste krimp optreedt (22 februari tot 15 maart) bij de proefstukken in de ruimte met (theoretisch) $RV > 95\%$, worden er zelfs nog vaker lagere waarden gemeten. Dit verklaart dus waarom de experimentele waarden veel hoger zijn dan de theoretisch berekende. Deze zijn namelijk berekend voor een relatieve vochtigheid van 95% en uiteraard zouden ze voor een lagere relatieve vochtigheid (minder weerstand) hoger uitgevallen zijn. Zo bekomt men voor een relatieve vochtigheid van 92,14% (gemiddelde over de hele periode) een theoretische krimp van 0,000156 en 0,000159 voor respectievelijk $W/C=0,8$ en 0,7. In de beginperiode bedraagt de gemiddelde relatieve vochtigheid zelfs slechts 87,33%. In een ruimte met een RV constant gelijk aan 95% zal de krimp voor zand-cement de theoretisch berekende waarde in Tabel 25 beter benaderen. Men kan concluderen dat de formule ter bepaling van de uiteindelijke krimp voor zand-cement gebruikt kan worden om een goede richtwaarde te hebben.

De evolutie in de tijd van de gemiddelde waarden per bewaringsconditie en water/cement-factor wordt weergegeven in Figuur 26.



Figuur 26: De gemiddelde krimpvervorming van prisma's 600x150x150 mm³

De curven zullen in het begin rap stijgen. Later zal de curve afvlakken en voor de proefstukken bewaard in de kamer met $RV=95\%$ zal er nog amper krimp optreden. De verklaring voor deze neiging tot stabilisatie is dat in het begin de krimp vooral te wijten is aan het uildrogen aan de buitenkant van het prisma. Daarna moet het nog aanwezige water een veel langere weg afleggen waardoor een grotere weerstand overwonnen moet worden om het proefstuk te verlaten. Daarom zal krimp na verloop van tijd veel trager optreden. [36]

Bij de proefstukken in de kamer met 95% relatieve vochtigheid vlakken de curves veel sterker af dan in de andere ruimte. Dit komt omdat, eens de relatieve vochtigheid van de ruimte bereikt wordt, de proefstukken niet verder vocht zullen verliezen. Er is dan een evenwicht bereikt tussen het proefstuk en zijn omgeving. Men kan zeggen dat de relatieve vochtigheid van het proefstuk na ongeveer 25 dagen 95% bedraagt. Aangezien de curven van de proefstukken in de ruimte met $RV=60\%$ nog steeds (licht) toenemen, kan men stellen dat er na 80 dagen nog steeds een hogere relatieve vochtigheid in het proefstuk is dan deze 60%.

De sprong die men ziet voor de proefstukken met $W/C=0,7$ in de vochtige kamer kan men niet fysisch verklaren. Een mogelijke uitleg hiervoor is, dat er vocht terecht gekomen is op deze proefstukken (bijvoorbeeld van de installatie die de vochtigheid moet garanderen in de ruimte). Bijlage G geeft alle van het Demectoestel afgelezen waarden.

Hoofdstuk 5

Extra proeven

5.1 Vochtmetingen

De bedoeling van de vochtmetingen is om te kijken hoe de relatieve vochtigheid in het proefstuk varieert. Zowel de absolute waarden van de relatieve vochtigheid als het verschil tussen de verschillende sensoren in het proefstuk worden besproken.

5.1.1 Proefmethode

Voor de vochtmetingen is er geen standaardproefmethode. In de proef die hier beschreven wordt, wordt gebruik gemaakt van sensoren van Sensirion. Om deze sensoren af te sluiten van de buitenwereld en om de relatieve vochtigheid in het proefstuk weer te geven, werd volgende proefopstelling bedacht (zie Figuur 27 voor de opstelling waarbij het prisma rechtop staat).



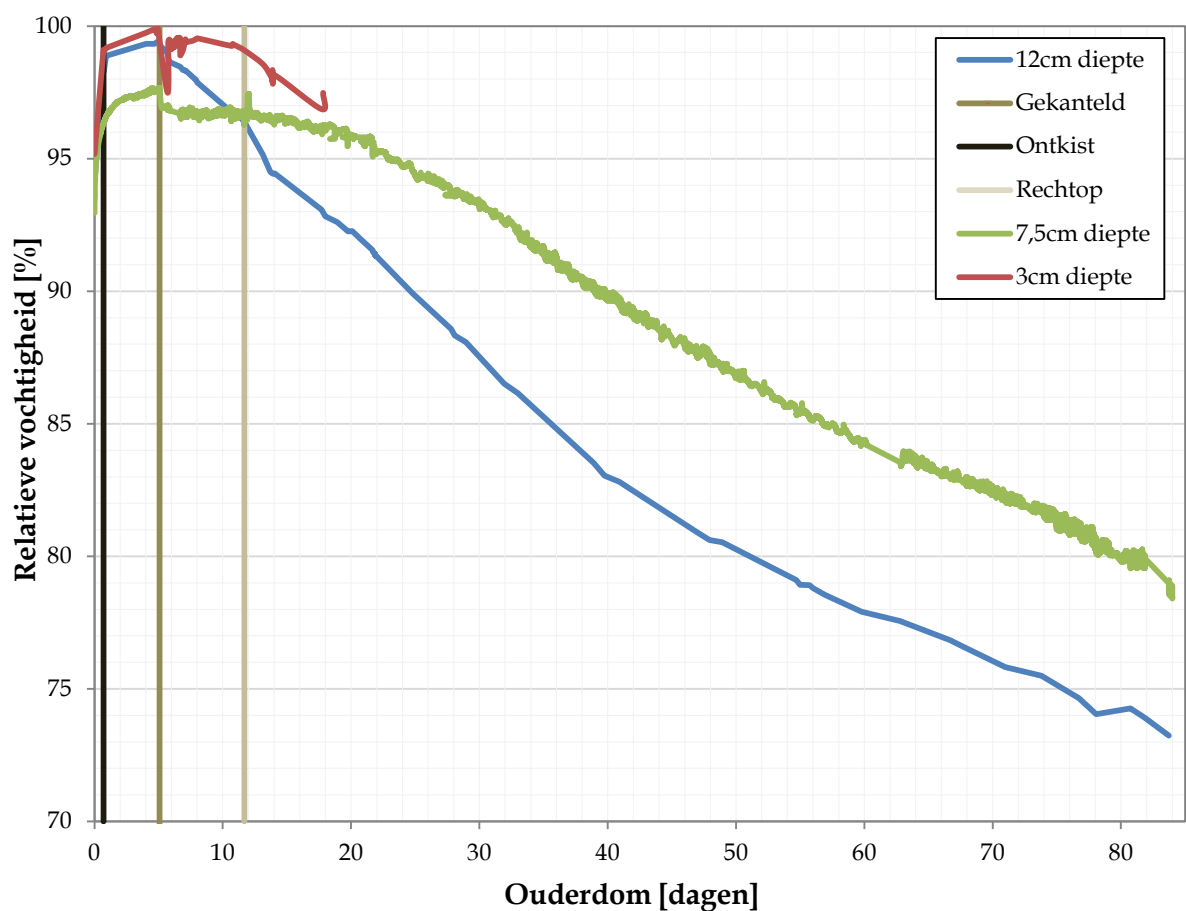
Figuur 27: Proefopstelling vochtmeting

De sensor zit in een holle buis die tot op een bepaalde diepte in het proefstuk komt om daar de relatieve vochtigheid en temperatuur te kunnen meten. De sensor wordt van de buitenwereld afgesloten door het buisje dat in het prisma gebracht is af te sluiten met een speciale tape. Dit dient

nauwkeurig te gebeuren om te vermijden dat de omgevingsvoorwaarden een te grote invloed hebben op de proefresultaten. Zo werd getracht om in het buisje een klimaat te creëren dat gelijk is aan dat van het proefstuk op de diepte tot waar men het buisje inbrengt. Er werden sensoren ingebracht op 3 verschillende dieptes, namelijk op 3 cm, op 7,5 cm en op 12 cm diepte in een liggend prisma $600 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ en dit verspreid over de lengte van het prisma.

5.1.2 Resultaten

Onderstaande figuur toont de variatie van de relatieve vochtigheid voor de verschillende dieptes. Voor enkele waarden van de relatieve vochtigheid (en eveneens de geregistreerde temperatuur) wordt de lezer doorverwezen naar Bijlage H.

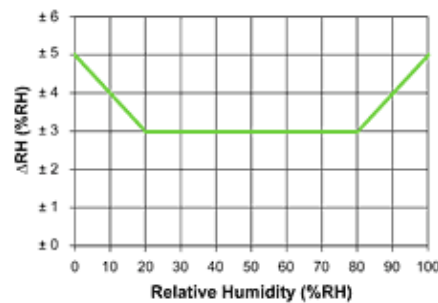


Figuur 28: Metingen van de relatieve vochtigheid

Hierop staan tevens 3 verticale lijnen getekend. Deze stemmen respectievelijk overeen met het tijdstip van ontkisten en twee tijdstippen waarop het proefstuk anders gepositioneerd werd. Aanvankelijk lag het proefstuk neer met de buisjes horizontaal. Vervolgens werd het proefstuk gekanteld opdat het nog steeds "liggend" was, maar ditmaal met de buisjes verticaal. Nog later werd het proefstuk "rechtop" gezet (Figuur 27). Hiermee komen de buisjes weer horizontaal, maar nu is er slechts een klein oppervlak dat steunt op de ondergrond en dus kan het proefstuk beter uitdrogen. Voor de sensor op 75 mm diepte, valt het op dat dit de uitdroging enorm bevordert. De curve verloopt plots veel steiler.

De sensor op 30 mm diepte wordt hier niet verder weergegeven omdat deze na een bepaalde tijd uit het proefstuk gehaald werd.

Er werden voor de relatieve vochtigheid zeer hoge waarden gemeten (95% en meer) en dit voor de sensor op 75mm diepte gedurende meer dan drie weken. Hierdoor kan men vermoeden dat de metingen foute resultaten weergeven. Tevens dient men te vermelden dat op de website van Sensirion (Figuur 29 [38]) te vinden is dat de nauwkeurigheid vermindert bij hogere vochtigheidsgraad.



Figuur 29: Nauwkeurigheid van de metingen

De schommelingen in de curves zijn te wijten aan enerzijds deze beperkte nauwkeurigheid en anderzijds de invloed van temperatuur op de relatieve vochtigheid. De temperatuur in de ruimte – en hierdoor eveneens in het proefstuk – vertoont onvermijdelijk variatie. Bij een hogere temperatuur is de mogelijkheid van de lucht om vocht op te nemen veel groter. Daarom zal eenzelfde relatieve vochtigheid bij een hogere temperatuur betekenen dat er meer water aanwezig is in het proefstuk.

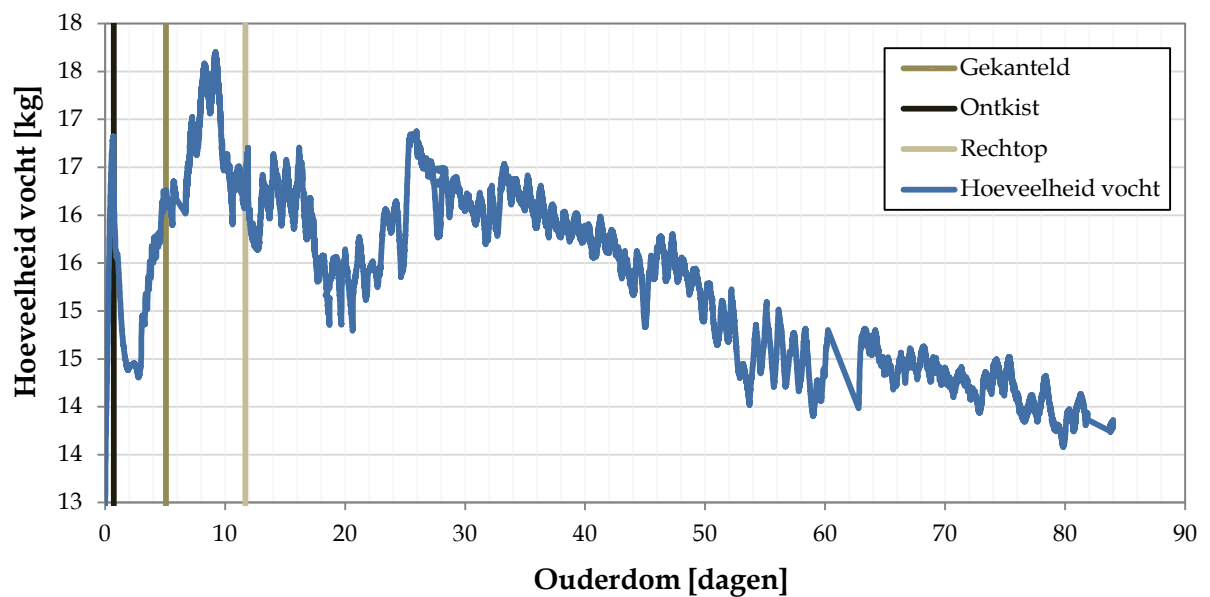
Bekijkt men volgende denkbeeldige situatie. Er is een temperatuurdaling in de ruimte⁹. Vlak ervoor en vlak erna is er evenveel vocht aanwezig. Maar toch zal de relatieve vochtigheid stijgen omdat deze uitgedrukt wordt in functie van de maximale hoeveelheid op te nemen vocht. Die is gedaald door de temperatuurdaling. Hierbij wordt er verondersteld dat variatie in temperatuur in het proefstuk (veel) rapper optreedt dan dat er vocht uit het proefstuk kan.

Schommelingen in temperatuur zouden bijgevolg de schommelingen in relatieve vochtigheid kunnen verklaren. Om na te gaan of de invloed van de temperatuurschommelingen weggewerkt kan worden, werd met behulp van een empirische formule¹⁰ [39] een waarde voor absolute vochtigheid afgeleid. Men kijkt naar de hoeveelheid vocht die zich in een volume van 1¹¹ m³ zou bevinden. Hiervoor rekent men met de relatieve vochtigheid en temperatuur die gemeten is in het proefstuk. Voor de sensor op 75 mm diepte, wordt dan volgende curve verkregen in functie van de tijd.

⁹ Deze temperatuur kan bijvoorbeeld plots dalen door het openen van de deur van de geacclimatiseerde ruimte.

¹⁰ Verdere uitweiding over deze formule valt buiten het kader van deze tekst (zie [39] voor meer informatie).

¹¹ De vorm van de curve is van belang en niet de absolute waarden die verkregen worden. Daarom stelt men eenvoudig het volume gelijk aan 1 m³.

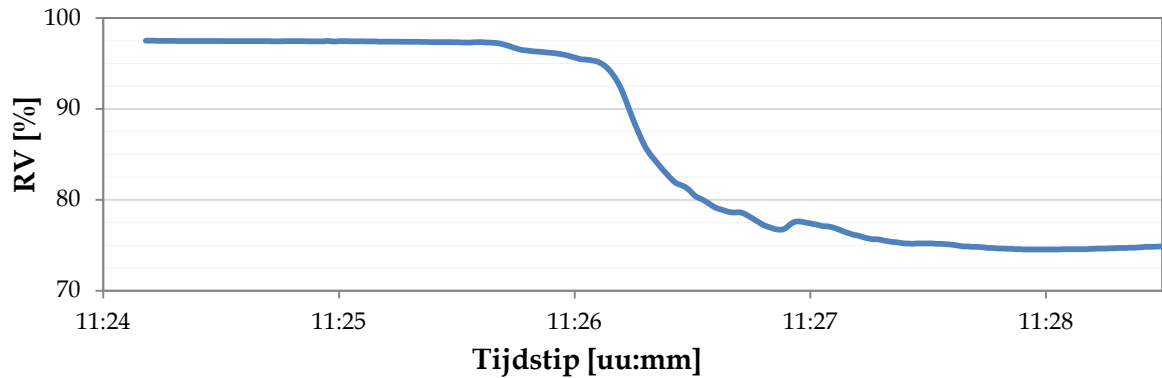


Figuur 30: Evolutie van de hoeveelheid vocht die in een volume van 1m³ aanwezig zou zijn met de gemeten relatieve vochtigheid en temperatuur in het proefstuk

De schommelingen zijn nog steeds zeer duidelijk waarneembaar en dus is het niet gelukt om de invloed van de temperatuur weg te krijgen. Daarom kan men stellen dat deze schommelingen gewoon te wijten zijn aan kleine onnauwkeurigheden van de sensor (zowel bij de meting van relatieve vochtigheid als temperatuur). Voor de plotse toename in vocht na een paar dagen tot ongeveer 10 dagen kan niet echt een verklaring bedacht worden. Het proefstuk is nooit blootgesteld aan water en dus wijst dit wederom op een fout in registratie. Een perfecte registratie wordt echter niet gegarandeerd door Sensirion zodat dit niet ongewoon is.

Een oorzaak voor de grote relatieve vochtigheid in deze proefopstelling zou kunnen zijn dat de sensoren té diep in de buisjes geplaatst zijn waardoor ze in contact zijn met het materiaal. Dit kan de sensoren beschadigd hebben of een te hoge vochtigheid veroorzaken omdat ze in rechtstreeks contact zijn geweest met vochtig materiaal.

Het proefstuk werd pas verdicht nadat de buisjes met sensor geplaatst werden. Zo zou er materiaal onder de buisjes tegen de sensor gekomen kunnen zijn. Als er op deze zeer gevoelige sensoren vochtig materiaal komt, zouden deze kapot kunnen gaan. Om dit te controleren, werd de sensor op 30 mm diepte uit het proefstuk gehaald na ongeveer drie weken. Er werd gekozen om deze sensor te verwijderen omdat de relatieve vochtigheid van deze sensor op dat moment veruit het hoogste was. En dit terwijl gelijke waarden verwacht werden als voor de sensor op 120 mm diepte. De eventuele fout bij de sensor op 30 mm diepte zal veel groter zijn dan bij de andere twee sensoren omdat de registratie net veel hoger was dan de vermoedelijke realiteit. De bedoeling was om na te gaan of de sensor, eens hij eruit was, de correcte relatieve vochtigheid (60% in de zaal waar het bewaard werd) zou meten. De metingen staan hieronder weergegeven.



Figuur 31: Relatieve vochtigheid van de sensor op 30 mm diepte wanneer deze uit het proefstuk gehaald wordt

Op minder dan een paar minuten daalt de sensor tot een vochtigheid van iets boven de 70%. Hieruit kunnen twee zaken geconcludeerd worden. De sensor werkte nog aangezien hij direct reageerde toen hij blootgesteld werd aan de omgeving. Maar hij haalt niet de verwachte waarde van 60%, wat de werkelijke relatieve vochtigheid van de omgeving is. Verklaring hiervoor is dat het vermoeden klopte dat er tijdens het verdichten materiaal op de sensor gekomen is. Dit vochtige zand-cement zal de registratie verstoren. Er werd na de daling tot 70% nog geprobeerd om het zand-cement weg te werken van de sensor, maar deze is hieraan helaas kapot gegaan. Er werden tijdens dit proper maken nog waarden geregistreerd maar deze variëren zodanig dat ze niet betekenisvol zijn. De belangrijkste conclusie is dat de metingen kunnen verdergezet worden voor de andere dieptes maar men moet in het achterhoofd houden dat er een onnauwkeurigheid is doordat de sensoren bevuild zijn.

Op Figuur 28 valt duidelijk op dat de relatieve vochtigheid voor de sensor op 120 mm diepte na het rechtop plaatsen onder de waarden van de sensor op 75 mm diepte kruipt. Dit is geheel volgens de verwachtingen aangezien het proefstuk hiervoor liggend stond waarbij de sensor op 120 mm diepte zich dicht tegen de ondergrond bevond waardoor dat deel van het proefstuk dus minder goed kan uitdrogen. Als het proefstuk rechtop staat echter, bevindt deze sensor zich langs diezelfde zijde nog maar 30 mm van de vrije lucht, waar de sensor in het midden zich overal op 75 mm van de vrije lucht bevindt. Dat dit een invloed heeft en dat de buitenkanten van het prisma bijgevolg veel rapper uitdrogen kan men dus duidelijk concluderen uit deze resultaten. De uitdroging gebeurt trager naarmate het proefstuk ouder wordt.

Als de waarden van deze proef echter vergeleken worden met de resultaten van de krimpmetingen, kan men stellen dat de hoge waarden voor de relatieve vochtigheid niet héél uitzonderlijk zijn. Bij de krimpmetingen werd vastgesteld dat na ongeveer 25 dagen een relatieve vochtigheid van 95% bereikt wordt in het proefstuk. Ook uit deze metingen kan men stellen dat pas op die leeftijd de relatieve vochtigheid gedaald is tot 95%. Als commentaar moet hier wel vermeld worden dat de vochtmetingen gebeuren in een omgeving met $RV=60\%$ en de krimpmetingen waarover sprake in een ruimte met $RV=95\%$ en dus zou het proefstuk waarmee de vochtmetingen geregistreerd worden normaalgezien rapper moeten uitdrogen zodat er waarschijnlijk toch een fout op de meting aanwezig is.

5.2 Proctordichtheid

De proefmethode en resultatenverwerking zijn gebaseerd op [40].

5.2.1 Proefmethode

Aangezien de wijze van verdichten een enorme invloed heeft op de proefresultaten werd de Proctorproef uitgevoerd om volgens een standaardmethode de invloed van het watergehalte op de volumemassa's te bepalen. De volumemassa's van de proefstukken vertonen telkens een relatief grote spreiding en er is bijgevolg moeilijk een verband af te leiden tussen water/cement-factor en volumemassa. Met de Proctorproef kan een objectief verband bekomen worden.

Na het mengen in een kleine mengkom wordt een deel van het materiaal in een stalen cilindervormige mal geplaatst. De hoeveelheid dient na verdichten ongeveer een derde van het volume van de mal in te nemen. Vervolgens brengt men met een hamer (24,4 N) die van 305mm hoogte gelost wordt, 25 slagen aan, uniform verspreid over het oppervlak van het mengsel (Figuur 32).



Figuur 32: Proctorproef: links de stalen mal, rechts de hamer

Dit herhaalt men drie keer zodat de cilinder gevuld is met verdichte grond. Nu kan het gewicht bepaald worden waaruit men dan de volumemassa kan afleiden. Er wordt ook een klein grondmonster gewogen en in de oven geplaatst om na 24u opnieuw gewogen te worden zodat men het watergehalte kent van de grond.

5.2.2 Resultaten

Zowel de natte als de droge volumemassa wordt berekend met onderstaande formules.

$$\rho_m = \frac{M_t - M_{md}}{V}$$

Met ρ_m = natte dichtheid van het gecompacteerd zand-cement [kg/m³]
 M_t = totale massa van het natte gecompacteerd zand-cement en de stalen mal [kg]
 M_{md} = massa van de stalen mal [kg] = 5,40725 kg
 V = volume van de stalen mal [m³] = $944 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{1 + \frac{w}{100}}$$

Met ρ_d = droge dichtheid van het gecompacteerd zand-cement [kg/m³]
 w = het watergehalte van het zand-cement [%]

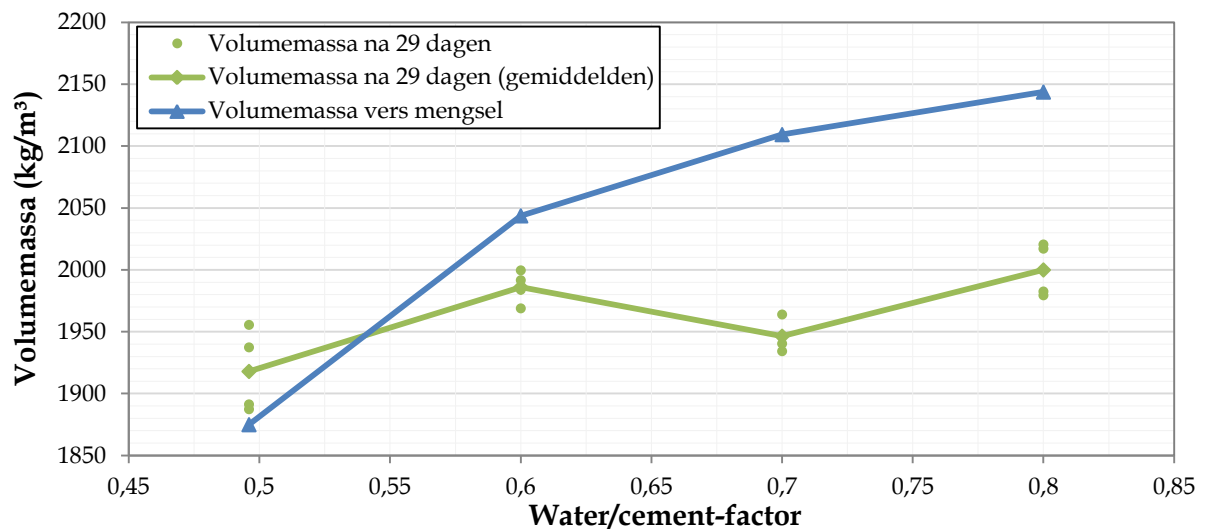
Dit watergehalte wordt bepaald door een kleine hoeveelheid te wegen. Men plaatst deze hoeveelheid vervolgens in een oven bij 105°C en 24u later (de variatie van het gewicht is dan klein genoeg) weegt men dit opnieuw. Het materiaal is nu gedroogd en bijgevolg kan men het watergehalte bepalen. [20]

$$w = \frac{M_{nat} - M_{gedroogd}}{M_{gedroogd}} * 100$$

Met M_{nat} = de massa van de natte hoeveelheid zand-cement [g]

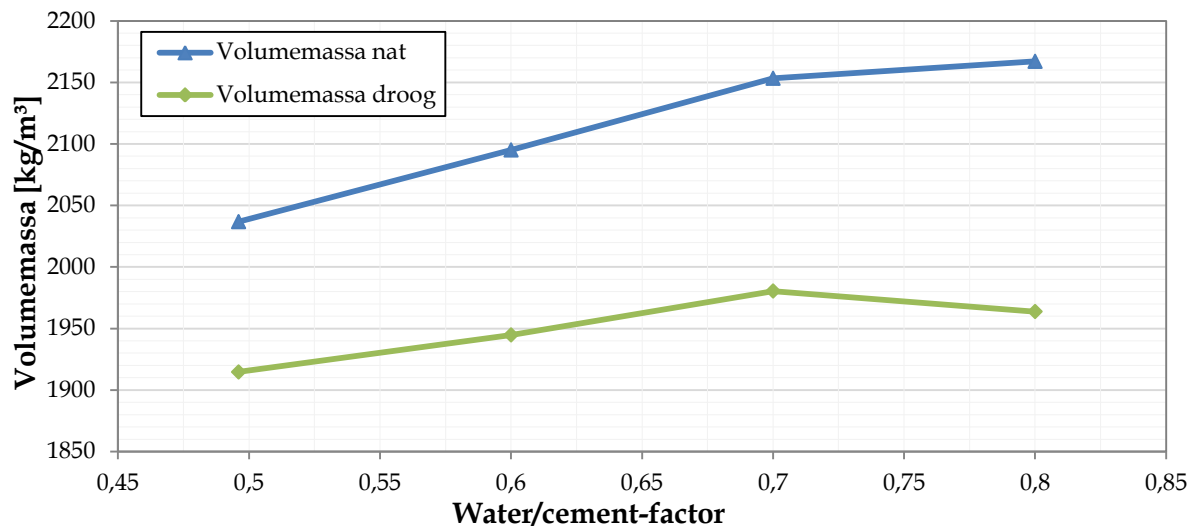
$M_{gedroogd}$ = de massa zand-cement na 24u drogen in de oven [g]

De proef werd uitgevoerd voor de vier water/cement-factoren die eerder onderzocht werden ter vergelijking van hun kubusdruksterkte. De volumemassa's die toen bekomen werden, staan in Figuur 33 weergegeven. Hier is voor de volumemassa's na 29 dagen een daling voor W/C= 0,7 te zien. De wegingen van het verse mengsel zijn slechts één maal gebeurd en worden daarom als minder representatief beschouwd.



Figuur 33: Volumemassa's voor vier verschillende W/C-factoren, zowel vers als na 29 dagen

Dit resultaat is moeilijk te verklaren en alles wijst erop dat de proefstukken met water/cement-factor 0,7 minder goed verdicht geweest zijn. De Proctorproef toont immers (Figuur 34) dat net voor deze verhouding de grootste droge dichtheid verkregen wordt. Voor de natte volumemassa's is er eveneens allesbehalve een dal te merken voor W/C=0,7. Ter vergelijking met de volumemassa's na 29 dagen zou men een waarde tussen de droge en natte volumemassa's van de Proctorproef moeten gebruiken. De proefstukken zijn al deels uitgedroogd maar zoals uit de vochtmetingen blijkt, is deze uitdroging bijlange niet te vergelijken met ovengedroogd materiaal. Het is vooral de trend die hier van belang is en minder de echte absolute waarden.



Figuur 34: Resultaten van de Proctorproef

Tabel 28: Resultaten van de Proctorproef

	W/C = 0,496	W/C = 0,6	W/C = 0,7	W/C = 0,8
Volumemassa nat [kg/m³]	2036,81	2095,07	2153,34	2167,11
Watergehalte [%]	6,38	7,73	8,73	10,35
Volumemassa droog [kg/m³]	1914,65	1944,76	1980,44	1963,77

Afgaande op deze resultaten kan geconcludeerd worden dat de verdichting onvermijdelijk een grote variatie vertoont. De kubussen waarvan de volumemassa's in Figuur 33 weergegeven zijn, werden immers allen door dezelfde persoon op hetzelfde tijdstip gemaakt. Dat dit tot een gelijke verdichtingsgraad leidt, blijkt hier helaas niet meer dan een illusie te zijn. De Proctorproef toont immers een top (voor ovengedroogde volumemassa's weliswaar) waar dit voor de kubussen net een dal is. Duidelijker kan het vermoeden dat de verdichting van zand-cementproefstukken uniform gebeurt niet weerlegd worden.

5.3 Afschuifsterkte van zand-cement

5.3.1 Proefmethode

Ter bepaling van de afschuifsterkte, worden grote prisma's met afmetingen 600x150x150 mm³ gebruikt die liggend vervaardigd worden. Zo test men de afschuiving volgens een richting verschillend van deze van de verdichtingsvlakken. Dit doet men om te lage sterktes door breuk langs deze vlakken te vermijden. Om de afschuifsterkte te kunnen bepalen, moet verhinderd worden dat de proefstukken aan buiging onderworpen worden. Eerst werd getracht om (met kleine prisma's) onderstaande vrij eenvoudige opstelling (Figuur 35) te gebruiken. Het proefstuk wordt ondersteund door twee stalen blokken en belast door een derde stalen blok. Deze bovenste blok moet het deel tussen de twee steunblokken uitduwen.



Figuur 35: Afschuiving, proefopstelling: met kleine prisma's

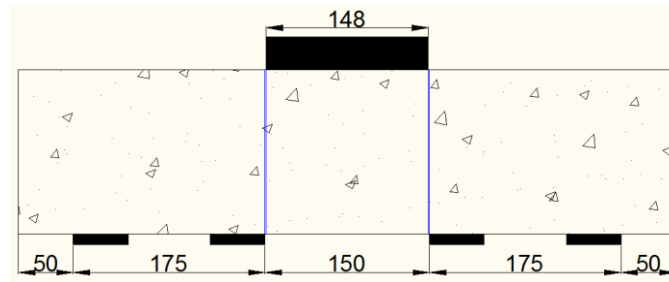
Dit had echter een breuk door buiging tot gevolg zoals te zien is op de figuur. Dit is te wijten aan het feit dat het prisma niet verhinderd werd om te buigen. Om buigingsbreuk te voorkomen, heeft ir. Tim Soetens in het laboratorium Magnel een opstelling gebouwd die de opwaartse beweging van de randen van de prisma's belemmert door deze in te klemmen. De opstelling is geschikt voor prisma's met doorsnede $150 \times 150 \text{ mm}^2$ en de proef wordt uitgevoerd in een drukpers. Figuur 36 geeft de opstelling weer en op Figuur 37 zijn de afmetingen aangeduid.

Het prisma steunt aan weerszijden op twee steunpunten. De stalen plaat waarmee het middendeel van het prisma uitgeduwd wordt, is iets smaller gemaakt om te vermijden dat deze de kracht naar de steunpunten overbrengt. De twee verticale lijnen duiden aan waar de afschuifvlakken zich normaliter moeten bevinden. In de praktijk zullen er geen mooie rechte lijnen, maar eerder kronkelige schuine afschuifvlakken ontstaan.

Op de prisma's worden tevens twee lvdt's of lineaire verplaatsingsopnemers geplaatst onder een plaatje dat aan het proefstuk geplakt is met lijm. Er komt een lvdt ter plaatse van het midden van de overspanning en ter plaatse van een steunpunt.



Figuur 36: Afschuiving, proefopstelling van ir. Tim Soetens



Figuur 37: Schematische voorstelling met aanduiding afmetingen

Hierdoor kan een kracht/verplaatsingsdiagram opgesteld worden. Als er enkel een lvdt in het midden geplaatst wordt, bekijkt men de absolute verplaatsing. Vermindert men deze met de verplaatsing ter hoogte van het steunpunt, dan bekomt men de slip. Dit is de relatieve verschuiving tussen het gedeelte dat ingedruwd wordt en het gedeelte boven het steunpunt. De proef wordt uitgevoerd met een constante verplaatsingstoename van 0,003 mm/s in plaats van met een klassieke krachttoename zoals bij het bepalen van de druksterkte. De regeling van deze snelheid gebeurt computergestuurd. Zulke nauwkeurige verplaatsingstoename gaat gepaard met een vrij grote schommeling van de krachten die uitgeoefend worden op het proefstuk. Dit heeft als gevolg dat er geen mooie lijnvormige curve geregistreerd wordt, maar een brede band.

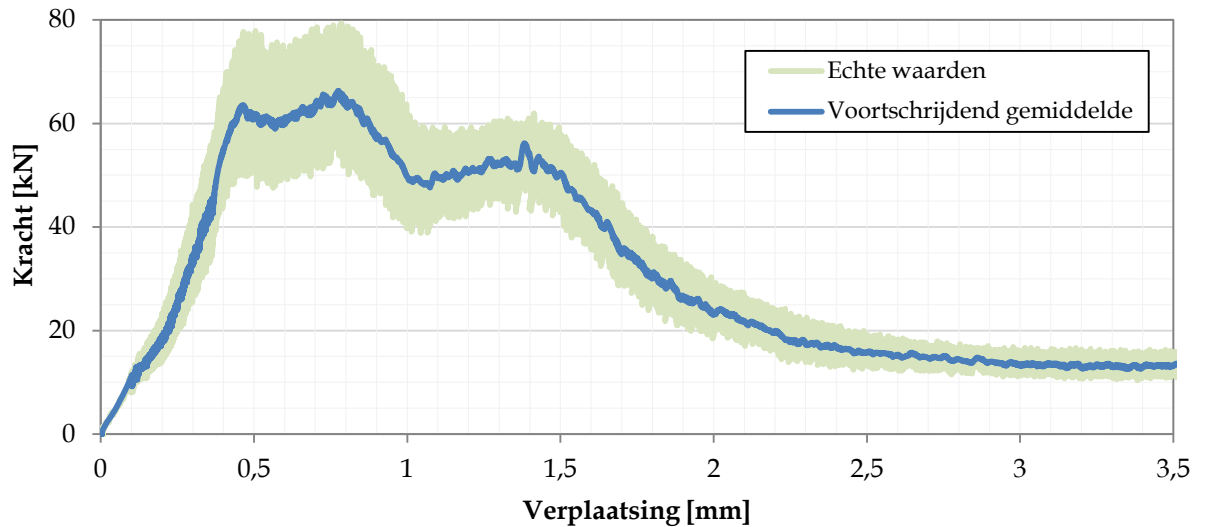
Eens het proefstuk gebroken is, blijven er 3 delen over. Met de twee buitenste delen van het prisma wordt telkens nog een splijtproef uitgevoerd. De proefmethode van de splijtproef is reeds uitgelegd in paragraaf 4.2 en wordt hier dus niet meer behandeld.

5.3.2 Resultaten

De geregistreerde kracht vertoont zoals vermeld grote schommelingen. Om die reden worden de resultaten uitgemiddeld met behulp van het voortschrijdend gemiddelde over 30 waarden heen¹². Zo wordt de brede band herleid tot een smallere curve (Figuur 38). De piekwaarden zijn verwijderd uit de grafiek. Door het maximum af te lezen van de curve van de voortschrijdende gemiddeldes rekent men veilig.

Op de grafiek worden de waarden van de absolute verplaatsing van de lvdt aan de overspanning weergegeven voor het proefstuk 0,6-1 (eerste proefstuk met $W/C=0,6$).

¹² De eerste waarde is het gemiddelde van waarde 1 tem 30, de tweede waarde is het gemiddelde van waarde 2 tem 31, enzovoort.



Figuur 38: Verschil in weergave tussen de geregistreerde (= "echte") waarden en het voortschrijdend gemiddelde (proefstuk 0,6-1)

Er zijn twee afschuifvlakken. Dit verklaart de factor 1/2 in onderstaande formule.

$$f_{afschuif} = \frac{1}{2} * \frac{P}{b * h}$$

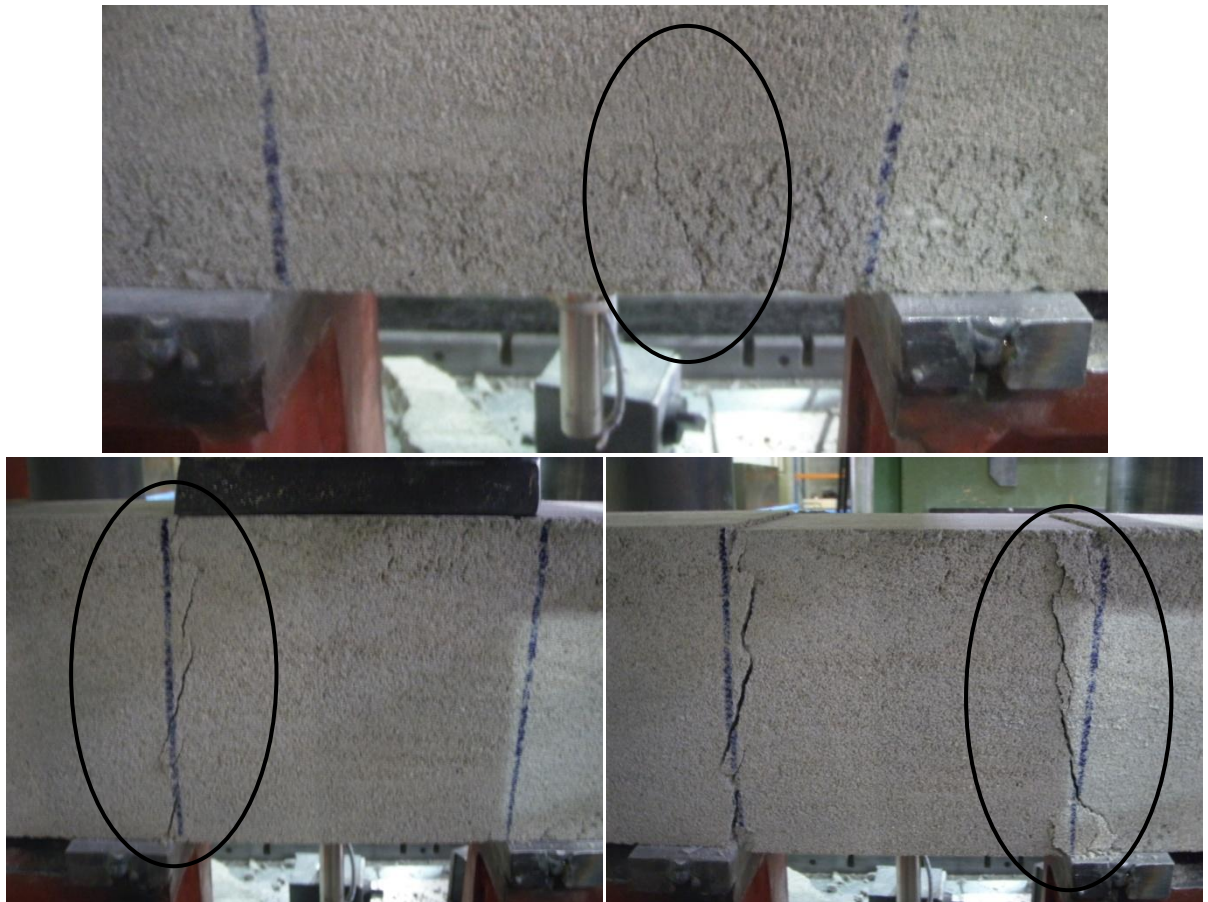
Met $f_{afschuif}$ = de afschuifsterkte van prisma's 600x150x150 mm³ [N/mm²]

P = de kracht waarbij het proefstuk bezwijkt [N]

b en h = respectievelijk breedte en hoogte van het proefstuk [mm]

De vorm van het diagram is eigen aan elk proefstuk en varieert dus, al is het principe wel altijd gelijkaardig. Op Figuur 38 zijn 3 pieken te onderscheiden. Deze zijn achtereenvolgens te verklaren door 3 scheuren (en bijgevolg rappere verplaatsing dus krachtafname om dit te compenseren) die in het proefstuk komen. De eerste scheur is te wijten aan buiging, ook al wordt dit zo goed mogelijk belemmerd. In het geval van deze grafiek is deze piek zeer duidelijk, maar meestal zal de buigingsscheur beperkt of niet optreden. De reden waarom de piek hier zo hoog gelegen is, is dat voor dit proefstuk het bekistingsvlak waarop het proefstuk steunde oneffen was. Hierdoor steunde het prisma vooral op de buitenste steunpunten en zo was de inklemming om buiging tegen te gaan een pak minder effectief. Dit fenomeen viel telkens op te merken bij de proefstukken met $W/C=0,6$ en is deels een verklaring voor de lagere waarden die hier verkregen worden. Het proefstuk wordt door deze fout in de opstelling eveneens onderworpen aan een nadelige torsie.

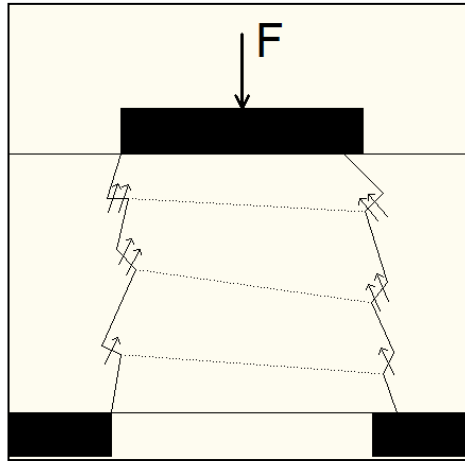
De twee pieken die vervolgens waar te nemen zijn, zijn te wijten aan de scheuren die ontstaan in beide afschuifvlakken. Deze zullen namelijk niet tegelijk op exact hetzelfde moment afschuiven. Na het afschuiven van het eerste vlak zal de kracht even afnemen om vervolgens na een nieuwe toename de breuk in het tweede afschuifvlak te veroorzaken.



Figuur 39: Evolutie in de tijd van de 3 scheuren bij afschuiving

Figuur 39¹³ geeft deze evolutie van de scheuren weer bij de afschuifproef. Als de buigingsscheur optreedt, is dit in het midden en is ze meestal niet opvallend. De beide afschuifscheuren treden op aan de steunpunten. Zoals te merken is op de figuur verlopen de scheuren niet mooi verticaal. Bij betonnen prisma's wordt dit tegengegaan door reeds rondom rond een beetje in het proefstuk te zagen om zo de afschuifvlakken op te leggen. Zand-cement is te zwak om dit slijpen aan te kunnen zonder al te veel schade te ondergaan. Als nadeel verkrijgt men dan zulk scheurpatroon. De afschuiving wordt tegengewerkt door wigvorming. Alle lagen zand-cement zullen steun vinden tegen de lager gelegen delen zand-cement. Figuur 40 toont deze wigvorming schematisch voor het rechtergedeelte van Figuur 39. De kleine pijltjes geven reactiekrachten weer die weerstand bieden aan de afschuiving. Deze wigvorming heeft een groot aandeel in de uiteindelijke afschuifsterkte.

¹³ De figuur bovenaan is van een ander proefstuk dan de figuren onderaan. Deze figuren werden toch gekozen omdat de fenomenen hier duidelijk zichtbaar zijn. De onderste figuren zijn trouwens toevallig van een proefstuk zonder buigingsscheur.



Figuur 40: Wigvorming bij de afschuifproef op zand-cementprisma's

Er werd gekozen om het kracht/verplaatsingdiagram van het proefstuk 0,6-1 weer te geven omdat de drie verschillende scheuren hierop zeer duidelijk zijn. Dat er drie duidelijke pieken zijn, betekent echter dat de afschuiving niet symmetrisch optreedt langs beide afschuifvlakken. Er is zelfs eerst een buigingsscheur. Dan pas komt de eerste afschuivingsscheur en ten slotte de tweede afschuivingsscheur. Idealiter is er geen buigingsscheur en schuift het middengedeelte af langs beide zijden tegelijk. Dit was niet het geval voor de proefstukken 0,6-1 en 0,6-2. Voor het proefstuk 0,6-3 wordt dan weer een logische curve verkregen voor de absolute verplaatsing, maar als men de relatieve verplaatsing bekijkt, bekomt men een onverklaarbare curve. Daarom zullen voor de proefstukken met $W/C=0,6$ de kracht/verplaatsingsdiagrammen gegeven worden met de absolute verplaatsing. Vanwege de afwijkende grafieken en veel lagere krachten worden zij niet mee opgenomen in de bepaling van het theoretische model, maar ze zijn wel terug te vinden in Bijlage J.

Onderstaande tabel toont de waarden van de afschuifsterktes en splijttreksterktes voor de onderzochte water/cement-factoren. Er werden telkens 3 proefstukken getest op afschuiving en dus 6 op splijt. Sommige gebroken stukken waren onbruikbaar voor de splijtproef. Ook de variatiecoëfficiënt wordt hier berekend. De proefstukken zijn allemaal getest op 28 dagen ouderdom.

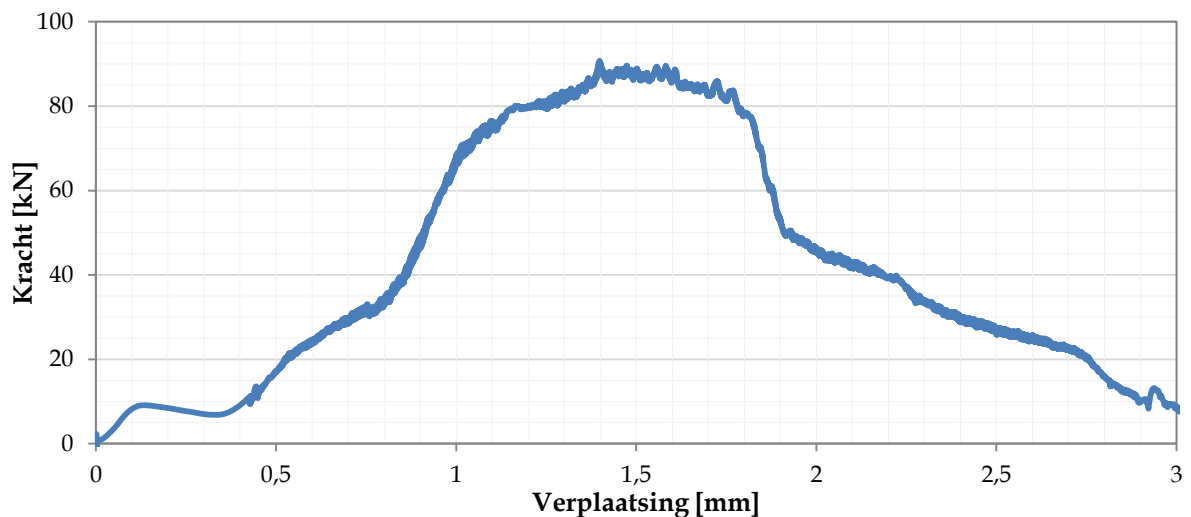
Tabel 29: Afschuifsterkte en splijttreksterkte van prisma's op 28 dagen ouderdom

W/C	Afschuifsterkte [N/mm^2]	c_v	Splijttreksterkte [N/mm^2]	c_v
0,6	1,56	0,09	1,19	0,10
0,7	2,66	0,21	1,30	0,13
0,8	2,63	0,17	1,40	0,13

De afschuifsterktes zijn voor $W/C=0,6$ deels lager door het ruwe bekistingsvlak waarop ze steunden. Dat kan niet de enige verklaring zijn voor zo'n groot verschil want de splijttreksterktes nemen eveneens toe voor hogere water/cement-factoren. In het algemeen kan men zeggen dat voor zowel de afschuifsterkte als de splijttreksterkte een hogere water/cement-factor gunstig is. De resultaten per proefstuk zijn terug te vinden in Bijlage I.

5.3.3 Theoretisch model

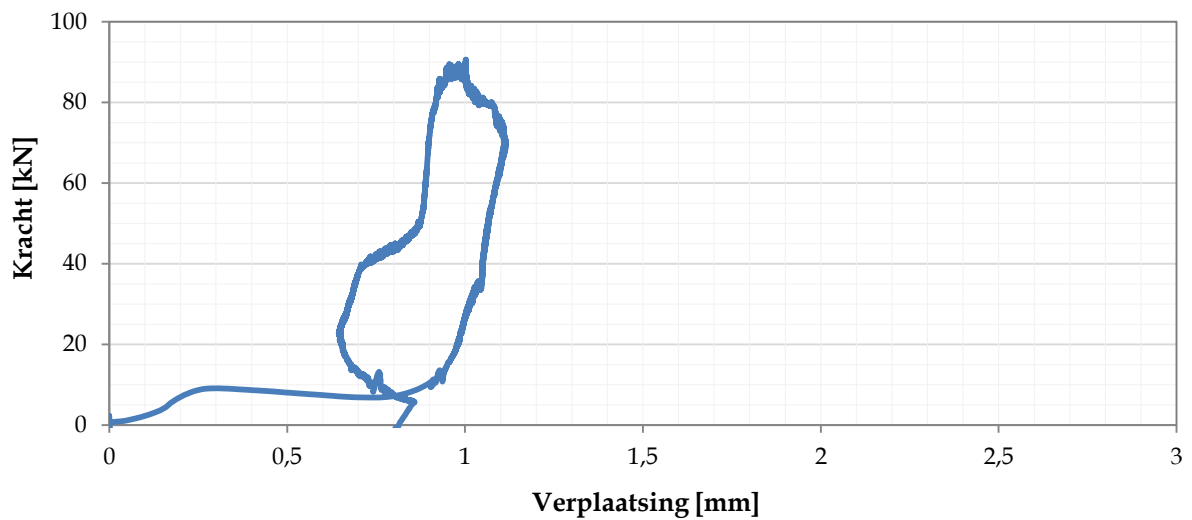
Er wordt een theoretisch model opgesteld dat de afschuifkracht uitzet tegenover de slip. Dit model is enkel opgebouwd voor de water/cement-factoren 0,7 en 0,8 wegens de onbruikbare resultaten voor $W/C=0,6$. Eerst wordt meer in detail het verloop van de verplaatsing bekeken. Het betreft hier altijd de voortschrijdende gemiddelden van zowel kracht als verplaatsing. De bespreking behandelt proefstuk 0,7-1.



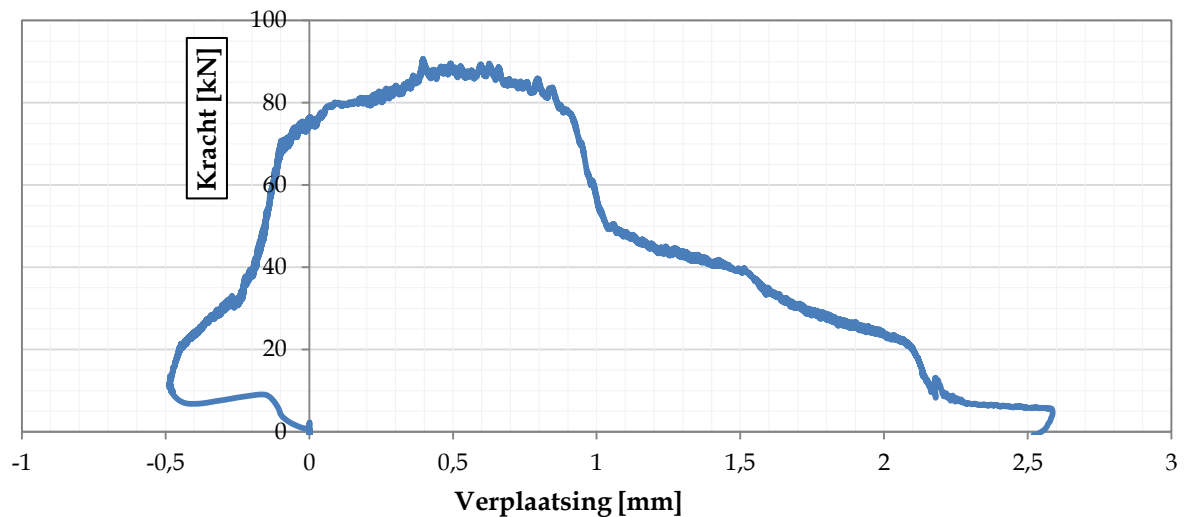
Figuur 41: Kracht/verplaatsing-diagram voor 0,7-1. Absolute verplaatsing van het midden.

Figuur 41 toont de kracht ten opzichte van de absolute verplaatsing van het midden. De verplaatsing van de eerste 0,5 mm tot een kracht 10 kN is te wijten aan de imperfecte opstelling. Het is onvermijdelijk dat de hulpstukken nog deels samengedrukt worden. Het proefstuk zal tegen de steunpunten aangedrukt worden tot alles goed vastzit. Dan begint de kracht toe te nemen. Bij een kracht van ongeveer 30 kN zal een zeer kleine buigingsscheur optreden. Deze is zo beperkt dat de piek amper te onderscheiden is. Vervolgens neemt de kracht lineair toe en begint de eigenlijke afschuiving. Er is één, brede, piek. Dit wijst op een symmetrische afschuiving van beide afschuifvlakken. De curve vertoont na een korte steile daling ten slotte een iets vlakkere tak ten gevolge van de residuele afschuifsterkte. Er blijft steeds een beetje weerstand bestaan na de breuk door het ineenhaken van de verschillende delen van het proefstuk.

De relatieve verplaatsing die opgemeten wordt ter hoogte van het steunpunt, vertoont een ander verloop (Figuur 42). Aanvankelijk zal door indrukking van het proefstuk de verplaatsing in dezelfde richting verlopen als deze in het midden. De eerste verplaatsing voor een kracht tot 10 kN is hier groter en bedraagt net niet 1 mm. Deze verplaatsing is lichtjes groter omdat ter plaatse van het steunpunt de indrukking van de opstelling samen met het vastzetten van het proefstuk een grotere invloed heeft. De krachtopbouw die de afschuiving veroorzaakt, heeft slechts een beperkte doorbuiging aan het steunpunt tot gevolg. Toch zal dit nog licht meebewegen tot de afschuifbreuk optreedt. Door het loskomen van het middendeel van het prisma zal het steunpunt opveren. Dat verklaart de verplaatsing in de andere richting na de piekwaarde.



Figuur 42: Kracht/verplaatsing-diagram voor 0,7-1. Absolute verplaatsing tpv het steunpunt.

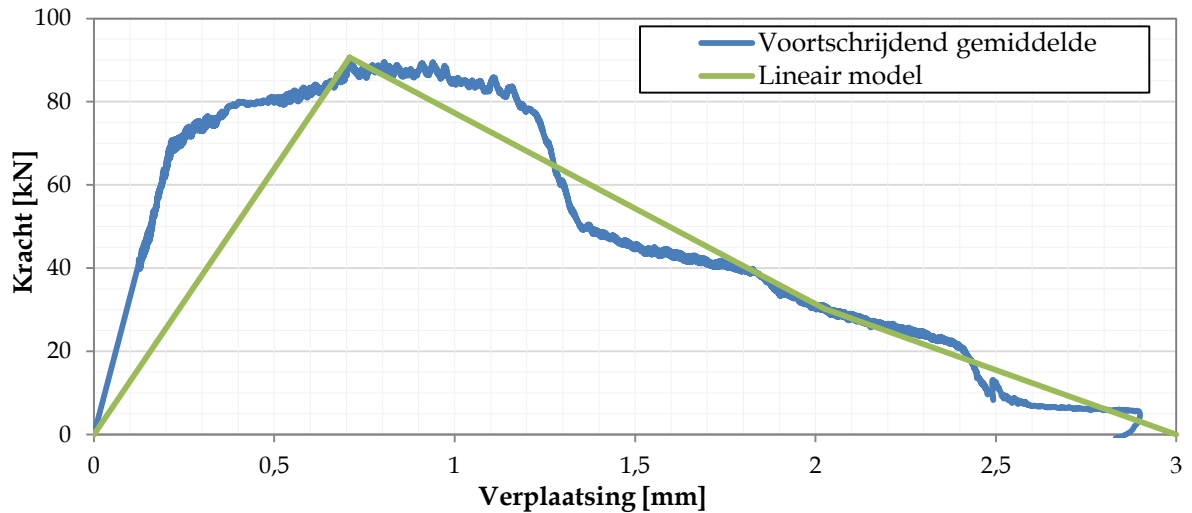


Figuur 43: Kracht/verplaatsing-diagram voor 0,7-1. Slip.

Bekijkt men aan de hand van beide absolute verplaatsingen de slip, of het verschil tussen de verplaatsing van het midden en het steunpunt, dan verkrijgt men Figuur 43. Dat deze curve negatieve waarden bekomt is te wijten aan de beginfase waar samendrukking en buiging zorgen voor een onregelmatig verloop van de curve. Om die reden wordt dit onregelmatig gedeelte steeds verwijderd uit de grafiek. Men kan via een lineaire trendlijn en een translatie van de grafiek het eigenlijke kracht/verplaatsingsdiagram bekomen voor slip dat gebruikt kan worden voor implementatie in computermodellen. Figuur 44 is een voorbeeld van dergelijke curve voor het proefstuk 0,7-1. Het zijn deze aangepaste grafieken die weergegeven worden in Bijlage J voor $W/C=0,7$ en $0,8$.

Bij het bepalen van een theoretisch model moet men onvermijdelijk benaderingen invoeren. Er wordt een model voorgesteld met drie lineaire delen. Een eerste rechte loopt van de oorsprong naar de piek. Een tweede rechte zal lopen van deze piek naar het punt waarmee een kracht overeenstemt met een derde van de piekwaarde. De derde rechte zal dit punt tot slot verbinden met het punt waar de slip 3 mm bedraagt en de kracht 0 is. Uit observatie van de verschillende grafieken is deze maximale slip van 3 mm naar voor gekomen. Het lineaire model is afhankelijk van 4 punten, waarvan start- en

eindpunt vast staan. De twee tussengelegen punten zijn afhankelijk van de vorm van de grafiek. Er wordt gebruik gemaakt van de gemiddelde waarden voor elke water/cement-factor. Men rekent met de afschuifsterktes (in N/mm^2) en niet met de kracht. Ter illustratie is op Figuur 44 het model getekend voor de kracht ipv de sterkte.



Figuur 44: Kracht/verplaatsing-diagram voor 0,7-1. Slip, na linearisering van het begin en het theoretische model.

Het model bestaat zoals vermeld uit vier punten. Onderstaande tabel geeft een overzicht. De slip wordt aangeduid met s [mm]. De maximale afschuifspanning is de afschuifsterkte en deze is gelijk aan $f_{afschuif}$ [N/mm^2].

Tabel 30: Vier punten van het theoretisch model voor de afschuifsterkte van zand-cement

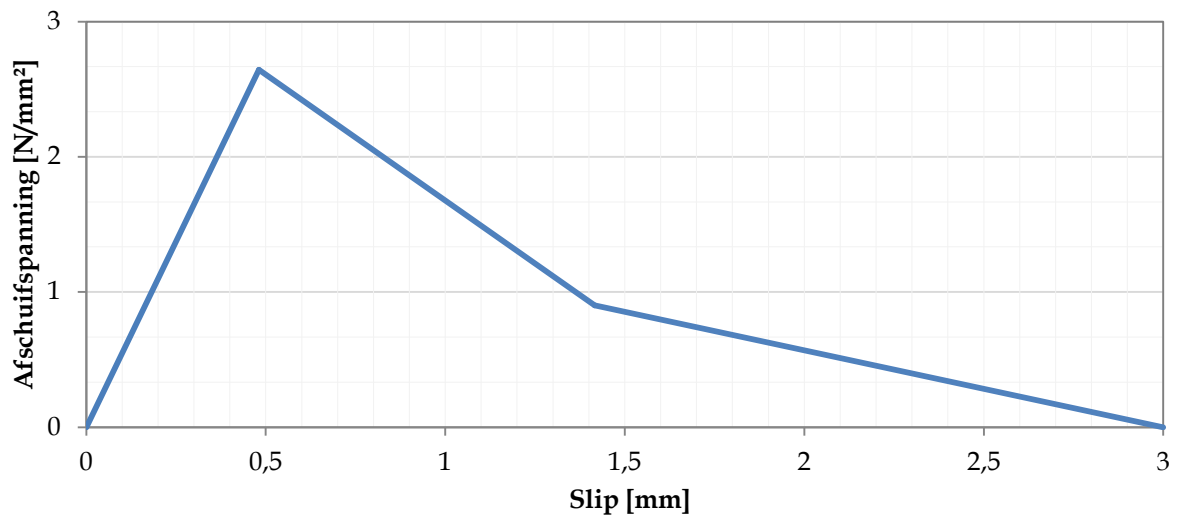
Slip [mm]	Afschuifspanning [N/mm^2]
0	0
$s_{f_{afschuif}}$	$f_{afschuif}$
$s(f_{afschuif})/3$	$f_{afschuif}/3$
3	0

Omdat de curven voor $W/C=0,7$ en $0,8$ geen verschil vertonen en zowel de slip als de afschuifsterkte van gelijke groottes zijn, wordt een algemeen model opgesteld voor zand-cement. Dit is geldig voor beide water/cement-factoren. Men berekent de gemiddelde waarden voor de vier punten van de lineaire benadering. De afschuifsterktes zijn reeds gekend, maar men moet telkens nagaan wat de overeenstemmende slip is. Tabel 31 en Figuur 45 geven het uiteindelijke resultaat.

Tabel 31: Gemiddelde waarden voor het theoretisch model

Slip [mm]	Afschuifspanning [N/mm^2]
0	0
0,48	2,64
1,42	0,90
3	0

De afzonderlijke waarden per proefstuk zijn te vinden in Bijlage I.



Figuur 45: Theoretisch model voor de afschuiving van zand-cement

Uiteraard zijn er veel complexere modellen mogelijk voor de afschuifsterkte van zand-cement. Voor de beperkte proeven die uitgevoerd zijn, is het echter moeilijk om dergelijke modellen voor te stellen. Ook zijn er weinig parameters gekend. Zo vereisen sommige modellen extra gegevens zoals de scheurwijdte, maar deze extra metingen zijn niet uitgevoerd. Met de gegevens die voorhanden zijn, is bovenstaand model een goede start om te gebruiken in computermodellerings.

Hoofdstuk 6

Hechtingsgedrag

In dit gedeelte wordt de hechting bestudeerd. Eerst wordt de hechtsterkte bekeken voor een zand-cementlaag op een betonnen ondergrond en dit zowel voor een trekkracht loodrecht op het contactoppervlak als voor een kracht die evenwijdig met dit oppervlak aangrijpt. In paragraaf 2.2.3 is reeds vermeld dat het loskomen van de tegels een veel voorkomend schadegeval is. Daarom zal ook deze hechting verder onderzocht worden en dit eveneens voor krachten loodrecht op en evenwijdig met het gelijkde oppervlak.

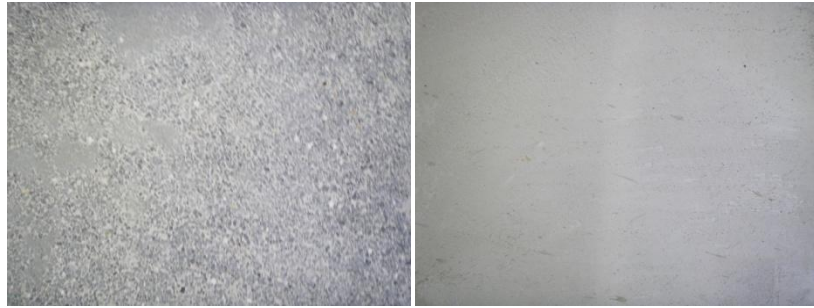
Voor het zand-cement wordt dezelfde samenstelling gebruikt als in de rest van de thesis (Tabel 17), maar hier worden de water/cement-factoren 0,6 en 0,8 bekeken (ipv 0,7 en 0,8). De hier besproken eigenschappen werden nog niet onderzocht in het TETRA-project. Bijgevolg werd gekozen voor een groter verschil in water/cement-factor om de invloed hiervan beter te kunnen beschouwen. Het feit dat deze proeven nog niet uitgevoerd zijn, heeft als gevolg dat er geen geschikte standaardmethode voorhanden is. Daarom werd telkens een proefmethode bedacht en deze wordt steeds beschreven. Uiteraard zijn de proefmethodes beperkt in hun nauwkeurigheid, maar er werd steeds getracht om een zo relevant mogelijke opstelling te bedenken. Omwille van het niet-officiële karakter van de proefopstelling kunnen de resultaten moeilijk als 100% betrouwbaar beschouwd worden. Het zijn evenwel goede richtwaarden die bijvoorbeeld kunnen dienen voor verder onderzoek of bij het opstellen van een computermodel.

6.1 Afschuiving tussen zand-cement en beton

In deze proef wordt nagegaan hoe goed de hechting van zand-cement op een betonnen ondergrond is bij een relatieve horizontale verplaatsing.

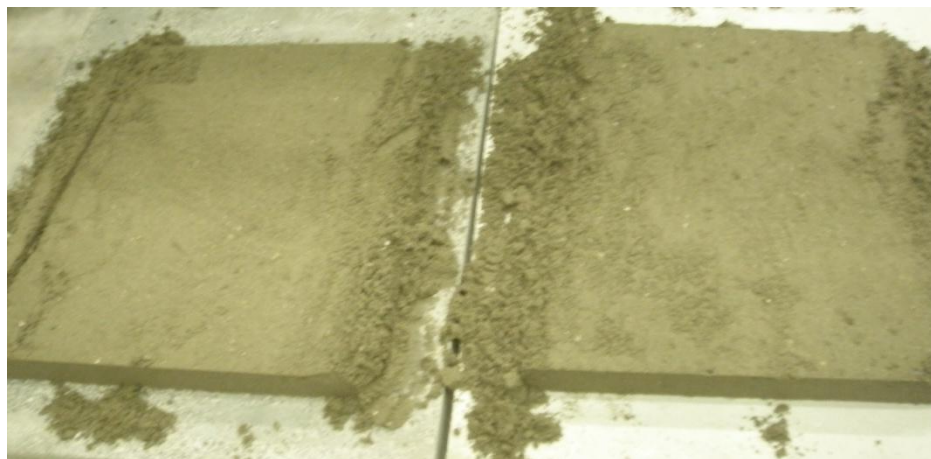
6.1.1 Proefstukken

Er werden twee betonnen platen - één met ruwe en één met gladde zijde (Figuur 46) - over een oppervlakte van 50x50 cm² bedekt met een 5cm dikke laag van zand-cement. Voor deze platen werd (omdat het slechts een test betrof) materiaal gebruikt van een samenstelling met cementgehalte 150 kg en W/C=0,6. In het vervolg wordt steeds gewerkt met het in deze thesis gebruikelijke cementgehalte van 250 kg. Enkel voor deze testplaten werd een lager cementgehalte gebruikt.



Figuur 46: Betonnen platen. Links: ruw. Rechts: glad

Deze testplaten werden 23 dagen na vervaardiging verzaagd in kleine platen om daarmee afzonderlijk te testen op 28 dagen ouderdom. Ook werden er cilinders geboord voor de hechtingsproef. Bij het boren en zagen bleek echter dat de proefstukken steeds kapot gingen. Bij het zagen kwam het zand-cementmateriaal los van de ondergrond en bij het boren viel het zand-cementmateriaal uiteen. Na slechts enkele slagen met een rubberen hamer, werd vastgesteld dat de plaat als één geheel van de ondergrond kwam. De hechting tussen dekvloer en ondergrond was dus quasi nihil. Dit alles wordt weergegeven op onderstaande foto's.



Figuur 47: Betonplaten met zand-cement (na vervaardiging). Links: ruw. Rechts: glad.



Figuur 48: Poging tot boren. Links: Onmogelijk mooie cilinder te verkrijgen. Midden: Plaat komt in zijn geheel los (geen hechting). Rechts: Puin ten gevolge van boren in zand-cement.

Om te vermijden dat er in de plaat moet geboord of gezaagd worden, werden alle proefstukken apart gemaakt op kleinere betonnen platen. Voor deze proef werden kleine vierkante platen met oppervlakte $158 \times 158 \text{ mm}^2$ gezaagd. Deze passen in de stalen mallen zodat de proefstukken eveneens eenvoudig bekist kunnen worden. De betonnen plaatjes steunen in de stalen bekistingsmallen op houten ondersteuning. Deze zijn op maat gemaakt zodat de zand-cementlaag 5cm bedraagt tot aan de bovenkant van de stalen mal. Voor de water/cement-factoren 0,6 en 0,8 werden drie plaatjes gemaakt op een ruwe en gladde betonnen ondergrond.

De betonnen platen worden niet van een hechtingslaag voorzien. De enige vorm van oppervlaktevoorbereiding bestaat uit het stofvrij maken met behulp van lucht onder hoge druk. De verdichting van de zand-cementlaag gebeurt met hetzelfde verdichtingsmateriaal als voor de standaardproefstukken. Deze worden om de 5 cm verdicht, wat hier zou betekenen dat de laag in één keer verdicht wordt. Om er voor te zorgen dat de hechting met de ondergrond voldoende is, wordt aangeraden om in lagen van maximaal 4 cm te verdichten. Daarom zal bij het maken van deze proefstukken in twee lagen verdicht worden. [11]



Figuur 49: Betonnen platen, houten steunblokjes en stalen mal vóór aanbrengen van het zand-cement

Figuur 50 toont een proefstuk dat tijdens het ontkisten of verplaatsen een tik heeft gekregen waardoor de hechting teniet gedaan is. Dit is het enige proefstuk (0,6-glad-1¹⁴) dat geen enkele hechting heeft. De zand-cementlaag kan zonder enige weerstand opgelicht worden van de ondergrond.



Figuur 50: Proefstuk 0,6-Glad-1 dat geen hechting vertoont

¹⁴ Benaming komt van "water/cement-factor 0,6 - op een gladde ondergrond - eerste proefstuk"

Dit proefstuk werd wel mee getest om te weten wat de weerstand is van een niet-hechtende zand-cementplaat op een betonnen plaat. Ten gevolge van eigengewicht en ineenhaken van de granulaten zal er sowieso een minimale kracht nodig zijn om het zand-cement van het beton te schuiven. De kracht die bekomen wordt, zegt natuurlijk niets over de hechtsterkte. Er kan wel bepaald worden of de andere proefstukken een hogere kracht halen. Als de kracht maar van dezelfde grootteorde is, dan weet men dat het desbetreffende proefstuk geen hechting vertoont tussen beton en zand-cement.

Daarnaast werden extra proefstukken gemaakt. Zo zijn er nog vier betonplaten met een grotere oppervlakte (ongeveer 150x220 mm²). Deze platen blijven in de houten bekisting tot op het moment van testen. Zo blijft de uitdroging beperkt en wordt de kans op breuk bij het ontkisten verkleind omdat de sterkte reeds groter is dan op de gebruikelijke ontkistingsleeftijd van 1 dag. Figuur 51 geeft deze proefstukken weer. Het betreft een zand-cementsamenstelling met $W/C=0,8$ en er zijn twee exemplaren op elke oppervlaktegesteldheid (ruw en glad). Verderop is er sprake van de “grote” platen.

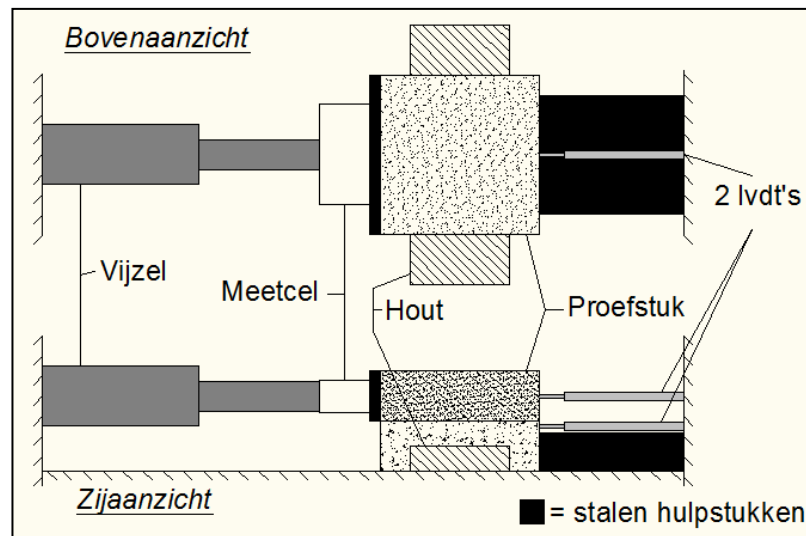


Figuur 51: Extra proefstukken met houten bekisting

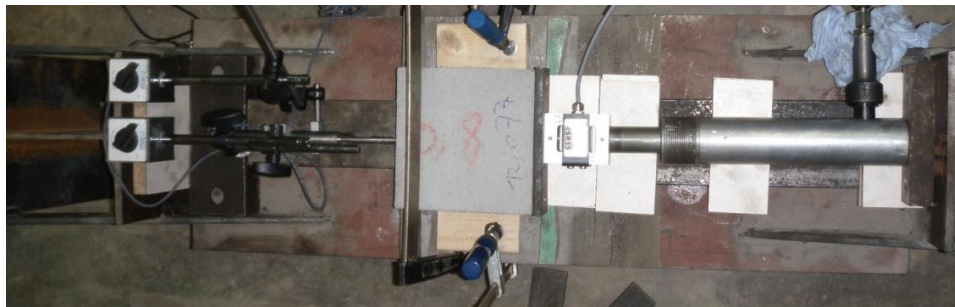
6.1.2 Proefmethode

Het doel is om de zand-cementlaag af te schuiven van de betonnen plaat. Daartoe moet de horizontale verplaatsing van het beton verhinderd worden. Tevens moet er een kracht uitgeoefend worden over het hele zijoppervlak van het zand-cement. Onderstaande figuren geven de opstelling. Voor deze proef werd gebruik gemaakt van een U-vormig stalen hulpstuk. Dit doet dienst als steun voor het proefstuk, de vijzel en de lvd't's en neemt tevens met de benen van de U alle horizontale krachten op. Tussen de beide uiteinden werden nog stalen profielen geplaatst tot tegen het proefstuk om de horizontale verplaatsing tegen te gaan.

Tevens moest de verticale verplaatsing verhinderd worden bij de sterkere proefstukken. Het proefstuk heeft namelijk de neiging om te kantelen aangezien de kracht bovenaan aangebracht wordt (namelijk op de zand-cementlaag en dus boven het zwaartepunt van het geheel). Om dat te vermijden worden tegen de betonplaat houten blokken geklemd welke dan zelf nog eens vastgezet worden tegen de ondergrond. Zo wordt een omgekeerde T-vorm gecreëerd waarvan men de verticale verplaatsing van de flenzen tegenhoudt. Figuur 55 geeft deze verbinding weer, zowel op foto als schematisch. Om een overvolle figuur te vermijden is deze verbinding niet weergegeven op Figuur 52.



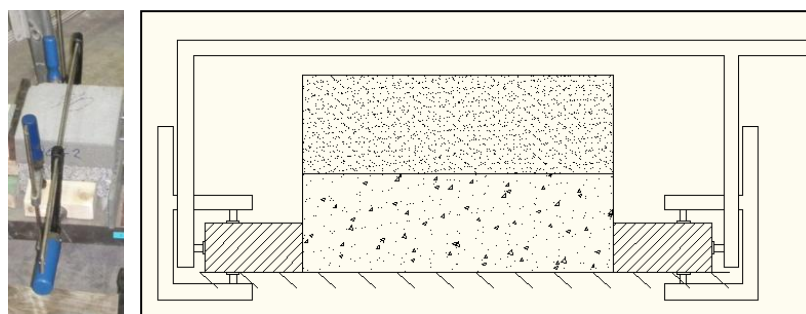
Figuur 52: Schematische proefopstelling afschuiving zand-cement op betonnen ondergrond



Figuur 53: Bovenaanzicht van de proefopstelling van afschuifsterkte tussen zand-cement en beton



Figuur 54: Links: detail lvd't's. Rechts: Detail vijzel met meetcel en stalen verdeelplaat



Figuur 55: Proefstuk als T-vormig geheel

Omdat er verwacht werd dat de krachten (naar aanleiding van de mislukte proefplaat en het mislukte proefstuk 0,6-Glad-1) zeer laag zouden zijn, wordt er gebruik gemaakt van meetcellen om de kracht zo nauwkeurig mogelijk te kunnen registreren. De gebruikte meetcellen hebben een capaciteit van achtereenvolgens 100N, 500N, 2kN, 5kN en 50kN. De krachten waren telkens onvoorspelbaar waardoor gestart werd met de kleinste meetcel, maar uiteindelijk bleek die van 50kN noodzakelijk om krachten boven 5kN te meten. De meting gebeurt steeds tot de maximumcapaciteit van de aanwezige meetcel, waarna er terug ontlast wordt en de kracht opgevoerd wordt tot de maximale waarde van de nieuwe meetcel om geen meetcellen te overbelasten. Dit proces wordt herhaald tot de zand-cementlaag afschuift.

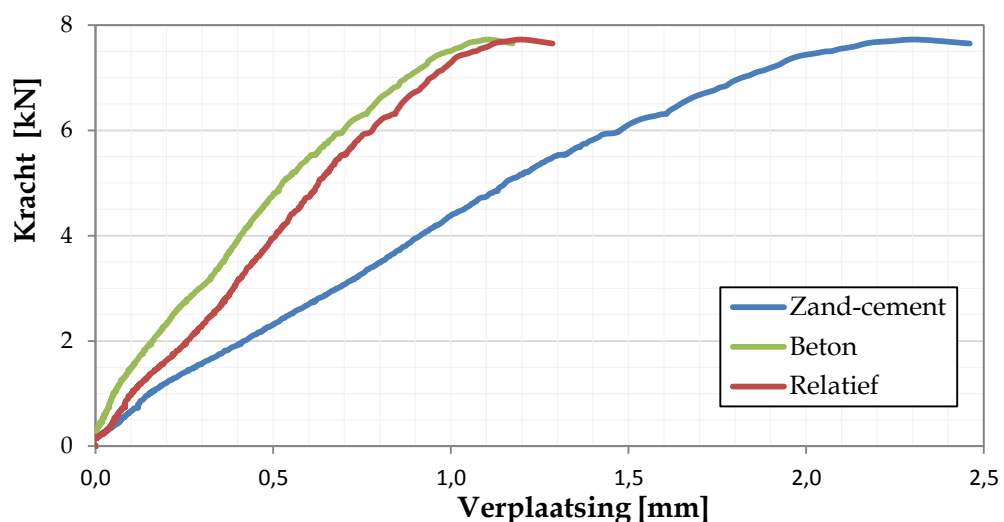
De kracht wordt aangebracht met een vijzel die gestuurd wordt door een elektrische pomp. Deze pomp wordt handmatig bediend en er wordt getracht om de kracht zo uniform mogelijk te laten toenemen. De belastingssnelheid is vrij laag zodat de proef wel enige tijd in beslag neemt. Nu er richtwaarden voorhanden zijn, kan men in de toekomst beter inschatten wat de sterktes zullen zijn en de belastingssnelheid kan hieraan aangepast worden. De vijzel brengt zijn kracht over op de meetcel, welke op zijn beurt de kracht via een stalen verdeelplaat doorgeeft naar de zand-cementlaag.

Naast de krachtregistratie met de meetcellen, wordt de verplaatsing gemeten. Dit gebeurt met behulp van 2 lvd't's. Eén ter plaatse van de betonnen ondergrond en één ter plaatse van de zand-cementlaag. Beide verplaatsingen worden opgemeten om zo de relatieve verplaatsing van de zand-cementlaag ten opzichte van de ondergrond te kunnen meten. De betonlaag zal namelijk nog lichtjes verplaatsen door onvermijdelijke indrukking van de opstelling.

6.1.3 Resultaten

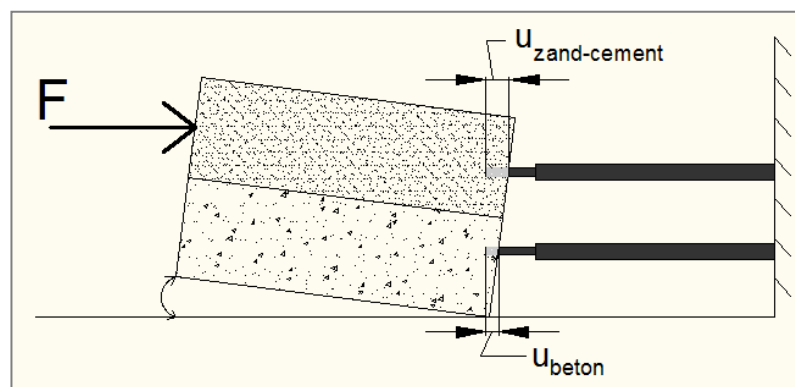
In tegenstelling tot de andere proeven worden alle resultaten gegeven omdat de spreiding hier nog groter is en omdat het geen standaardproef betreft en dus kan eventueel besloten worden voor verder onderzoek om een paar uitschieters buiten beschouwing te laten.

Als resultaat wordt het kracht/verplaatsingsdiagram verkregen van de opgemeten verplaatsing van de betonnen ondergrond en de zand-cementlaag en de relatieve verplaatsing tussen beide. Ter illustratie staan hieronder de curves van het proefstuk "0,8-Ruw-2".



Figuur 56: Kracht/verplaatsingsdiagram voor afschuivingsproef van zand-cement op beton (0,8-ruw-2)

Reeds bij een lage kracht is er een verplaatsing waar te nemen. Zoals eerder aangehaald is dit te wijten aan de imperfecte inklemming van de betonnen tegel. Door de verschillende stalen profielen die geplaatst worden tussen de uiteinden van de stalen U-vorm en het proefstuk zelf, zal er steeds enige speling optreden. Ook werd er gebruik gemaakt van een houten spie om de speling wat op te vullen. Dit zorgt er natuurlijk voor dat er bij een kracht die lager is dan de hechtsterkte vanalles samengedrukt kan worden door de verplaatsing van het hele proefstuk. De reden waarom de verplaatsing van het zand-cement toch hoger gelegen is dan deze van het beton is omdat er door het belasten een kantelmoment ontstaat. De zand-cementlaag zal afschuiven en daardoor verplaatsen, maar ook dit kantelmoment speelt mee. Aangezien de lvd'ter plaatse van de zand-cementlaag hoger geplaatst is dan deze van de betonnen onderlaag, zal deze eerste verplaatsing hoger uitvallen. Figuur 57 toont dat de verplaatsing van de zand-cementlaag groter is dan deze van de betonlaag.



Figuur 57: Fout in de registratie van de verplaatsing door kantelen

Dit alles wordt zo goed mogelijk beperkt door de hele constructie met de houten blokjes zoals deze in paragraaf 6.1.2 beschreven werd, maar blijft onvermijdelijk lichtjes aanwezig en dit zeker bij de proefstukken die grotere krachten halen.

De grafiek vertoont plotseling een vermindering in kracht en wordt vanaf daar stopgezet. Verdere registratie geeft op zeer korte tijd een sprong in de curve doordat de zand-cementlaag wegspringt van de betonnen ondergrond. De maximaal behaalde waarde heeft deze verplaatsing en dus het loskomen van de beide lagen veroorzaakt. De kracht werd meteen verminderd waardoor het vervolg van de curve niet meer getoond wordt. De bekomen kracht wordt gedeeld door het gemeten oppervlak en zo wordt de afschuifsterkte berekend in onderstaande tabel.

Tabel 32: Afschuifsterkte van zand-cementlaag op een betonnen ondergrond

Ondergrond	W/C=0,6	W/C=0,8	Grote platen (W/C=0,8)
	Afschuifsterkte [N/mm ²]	Afschuifsterkte [N/mm ²]	Afschuifsterkte [N/mm ²]
Glad - 1	0,0010	0,1203	0,2505
Glad - 2	0,0095	0,1193	0,0719
Glad - 3	0,0042	0,3018	-
Glad - gem.	0,0068	0,1805	0,1612
Ruw - 1	0,0667	0,3660	0,3331
Ruw - 2	0,0234	0,3074	0,3533
Ruw - 3	0,0584	0,3482	-
Ruw - gem.	0,0495	0,3405	0,3432

Een kleine nuance die hier nog gemaakt moet worden is dat de waarde van “0,6-Glad-1” niet meegerekend wordt bij de gemiddelden, omdat dit proefstuk zoals vermeld reeds losgekomen was vooraleer de proef uitgevoerd werd. Aangezien de andere sterktes een pak hoger uitvallen, kan geconcludeerd worden dat bij deze proefstukken wel degelijk hechting aanwezig was.

Bekijkt men enkel de waarden in de eerste twee kolommen van de tabel (zelfde bekistingsmethode en gelijke oppervlakte) dan valt meteen op te merken dat er een serieus sterkteverschil is tussen de verschillende proefreeksen. Dit verschil is zowel aanwezig tussen de beide ondergronden als tussen de beide samenstellingen. Het eerste lijkt zeer logisch aangezien een ruwer oppervlak meer mogelijkheden geeft voor de zand-cementlaag om in te haken in de betonnen ondergrond. De uitspringende granulaten van het beton zijn een soort weerhaken voor de zand-cementlaag. Het tweede verschil is echter minder vanzelfsprekend. Dat de verschillen zo groot zijn tussen beide water/cement-factoren, was niet te verwachten. Globaal gezien verschillen de waarden namelijk een grootteorde en dus kan men zeggen dat een hogere water/cement-factor duidelijk een betere hechting veroorzaakt.

Vergelijkt men de waarden voor $W/C=0,8$ voor de gewone en de grote plaatjes dan ziet men dat de gemiddelde waarden zeer dicht bij elkaar gelegen zijn. Dit betekent dat enerzijds het oppervlak waarover afgeschoven wordt en anderzijds de bekistingswijze een geringe invloed hebben.

Wat ook opmerkelijk is, is de veel grotere spreiding van de resultaten voor de gladde ondergrond in vergelijking met de ruwe. Voor het zand-cement welke op een gladde ondergrond ligt, is er een veel grotere afhankelijkheid van enkele ruwere delen van dat oppervlak (aangezien deze uiteraard niet perfect glad zijn) en daardoor dus een grotere variatie in resultaten.

6.1.4 Theoretisch model

De verkregen kracht/verplaatsingsdiagrammen zijn allen weergegeven in Bijlage K. Er is teveel verschil in deze curven om een theoretisch model te kunnen opstellen. Nauwkeurigere metingen, bijvoorbeeld volgens een verplaatsingstoename in plaats van krachttoename, kunnen vermoedelijk betere curven veroorzaken. Dan kan de dalende tak gemeten worden. Nu stopt de meting telkens als de maximale kracht bereikt wordt. Voor de stijgende tak is de curve soms eerder lineair, soms duidelijk parabolisch. De ene keer loopt ze heel steil, de andere keer heel vlak. Met deze curven een model voorstellen is bijgevolg onmogelijk.

6.1.5 Evaluatie proefopstelling

Figuur 55 toont hoe de proefstukken bij de afschuivingsproef geklemd werden tussen houten blokken om zo te voorkomen dat deze proefstukken een verticale verplaatsing of kanteling zouden ondergaan. Achteraf gezien was het natuurlijk beter om de betonnen proefstukken iets breder te maken. Men zou dan hierop een houten bekisting moeten plaatsen, want het voordeel dat ze in de stalen bekisting geplaatst kunnen worden, valt nu weg. Als motivatie kan echter de veel eenvoudigere én solidere inklemming vermeld worden. In plaats van gebruik te moeten maken van houten blokken, kunnen de betonnen overbreedtes (ten opzichte van de zand-cementlaag) nu vastgeklemd worden aan de stalen U-vorm om verschuiving en kanteling tegen te gaan.

6.2 Hechting tussen zand-cement en beton

6.2.1 Proefstukken

Voor het maken van de proefstukken, werd er om dezelfde redenen als hierboven gebruik gemaakt van reeds op voorhand geboorde betonnen cilinders met diameter 100 mm. Aanvankelijk werden deze geplaatst in stalen cilinders op een houten hulpstuk om analoog als voor de vierkante tegels vervolgens een laag zand-cement van 5cm erop te plaatsen. Bij het ontkisten van deze cilinders (wat reeds op 1 dag ouderdom gebeurde) is de zand-cementlaag echter volledig losgekomen van de betonplaat. Daarom moest een iets minder voor de hand liggende bekisting bedacht worden die eenvoudig te verwijderen is. Er zijn plastic regenbuizen met binnendiameter 100 mm doormidden gezaagd zodat twee halve cilinders bekomen worden. Deze worden met behulp van plakband terug aaneengezet en zo kan bij het ontkisten het plakband verwijderd worden. De twee helften kunnen van rond het proefstuk gehaald worden zonder het proefstuk aan wrijving te onderwerpen. Figuur 58 toont de proefstukken.



Figuur 58: Proefstukken in regenbuizen



Figuur 59: Links: trekschijf op beton. Rechts: ontkist proefstuk met zowel boven als onder een trekschijf

Op deze proefstukken worden een paar dagen op voorhand op boven- en onderzijde trekschijven¹⁵ bevestigd met een hogesterktelijm. Pas op de dag van het testen (op 28 dagen ouderdom) worden de

¹⁵ Deze trekschijven hebben een kleinere diameter dan de proefstukken, maar door de hoge hechting van de hogesterktelijm in vergelijking met de bereikte sterktes zullen deze kleinere schijven volstaan.

proefstukken ontkist. Ook nu zijn er 12 proefstukken gemaakt volgens hetzelfde principe als in vorige proef, namelijk 3 per oppervlaktetoestand (ruw of glad) en 3 per water/cement-factor (0,6 of 0,8).

6.2.2 Proefmethode

Het proefstuk wordt in een trektoestel geplaatst zodat een trekproef uitgevoerd wordt op de tweelaagse cilinder. De kracht wordt opgevoerd tot breuk optreedt.



Figuur 60: Proefstuk in het trektoestel

6.2.3 Resultaten

De proef levert amper bruikbare resultaten op. De redenen hiervoor zijn divers. Zo zijn de proefstukken met $W/C=0,6$ op een gladde betonnen ondergrond allen reeds kapot gegaan tijdens het verplaatsen (door de regenbuis bovenaan vast te nemen bijvoorbeeld) of ontkisten.

Dit was wegens de resultaten van de afschuifproef nog enigszins acceptabel omdat de samenstelling met $W/C=0,6$ op een gladde ondergrond duidelijk lagere resultaten behaalt. Vier van de resterende proefstukken zijn gebroken in de betonplaat en dit bij een belasting die zéér laag was (< 1 kN) wat bijgevolg duidt op het feit dat de betonplaat die hier als ondergrond gebruikt wordt extreem zwak in trek is¹⁶. Daarnaast is er een proefstuk gebroken in de zand-cementlaag. De andere proefstukken breken – zoals er op voorhand verwacht werd – wél in de hechtingslaag tussen zand-cement en beton. Deze drie manieren van breuk worden weergegeven in onderstaande figuur.

¹⁶ Zó een lage treksterkte kon uiteraard niet op voorhand voorspeld worden tenzij er trekproeven uitgevoerd waren. Mogelijks start er aan de dikke stalen wapeningsstaven in de betonplaat een verderzettend breukvlak.



Figuur 61: Breuk bij hechtingsproef. In beton (links), in zand-cement (midden) of in de hechtingslaag (rechts)

In Tabel 33 staan de hechtsterktes welke bekomen worden door het delen van de trekkracht door de oppervlakte van de cirkel met diameter 100 mm.

Tabel 33: Hechtsterkte van zand-cementlaag op een betonnen ondergrond

Ondergrond	W/C=0,6		W/C=0,8	
	Hechtsterkte [N/mm ²]	Breukvlak	Hechtsterkte [N/mm ²]	Breukvlak
Glad - 1	0	Hechting	0,019	Hechting
Glad - 2	0	Hechting	0,107	Hechting
Glad - 3	0	Hechting	0,033	Hechting
Glad - gemiddeld	0		0,053	
Ruw - 1	0,014	Beton	0,019	Beton
Ruw - 2	0,023	Beton	0,094	Beton
Ruw - 3	0,014	Hechting	0,298	Zand-cement
Ruw - gemiddeld	0,017		0,137	

De proefstukken op gladde ondergrond breken steeds in de hechtingslaag. Dat betekent dat de hechting hier zwakker is dan de individuele treksterkte van de zand-cement- en betonlaag. Voor W/C=0,6 is er geen kracht nodig om beide lagen van elkaar te verwijderen. Voor de proefstukken met W/C=0,8 is er wel een zekere hechtsterkte, al is deze miniem.

Van de proefstukken op een ruwe ondergrond is in 5 van de 6 gevallen de treksterkte van het beton- of zand-cement bereikt. Daaruit kan men enkel een minimale hechtsterkte afleiden. Dat de treksterktes voor W/C=0,8 hoger zijn, kan te wijten zijn aan puur toeval. Al zou het eveneens kunnen dat bij deze hogere waarden het proefstuk met W/C=0,6 reeds zou onthechten. Dit kan bevestigd worden door het proefstuk 0,6-Ruw-3 dat slechts een hechtsterkte van 0,014 haalt. Het is echter mogelijk dat dit een uitzonderlijke negatieve uitschieter is. Het proefstuk 0,8-Ruw-3 breekt in de zand-cementlaag. De hechtsterkte bedraagt hier minstens 0,298N/mm². Dit is de hoogst bereikte waarde van alle proefstukken. De combinatie “ruw” en “W/C=0,8” bereikt ook voor afschuiving de beste resultaten. Misschien zijn deze hogere waarden en de onthechting voor W/C=0,6 dus toch geen toeval. Echte conclusies maken op basis van deze beperkte gegevens is echter riskant.¹⁷

¹⁷ Meer resultaten zouden uiteraard gewenst zijn, maar deze proeven werden in de eindfase van de thesis uitgevoerd zodat er helaas geen tijd restte (rekening houdende met de droogtijd van 28 dagen) om de proeven opnieuw uit te voeren.

6.2.4 Evaluatie proefopstelling

Omdat er voor deze proef een ongeschikte betonnen ondergrond gebruikt werd, kan er moeilijk een grondige analyse van de proefopstelling gebeuren. Beton met een hogere treksterkte kon vermoedelijk betere resultaten opleveren.

De proefstukken met $W/C=0,6$ op een glad oppervlak kwamen allen los zonder dat er enige kracht bij kwam kijken. Dit kan volledig te wijten zijn aan de beperkte hechtsterkte en kan dus niet opgelost worden met een andere proefopstelling.

Een voor de hand liggend voorstel voor een ander proefstuk is een grote betonnen plaat met een zand-cementlaag. Zoals reeds vermeld kan er echter niet zonder de nodige schade te veroorzaken geboord worden in deze plaat. Men kan dan suggereren om op de zand-cementlaag op een paar plaatsen een trekschijf te plakken. Als men hier vervolgens aan trekt, om te meten wat de hechtsterkte is tussen zand-cement en beton, moet men echter rekening houden met de afschuifsterkte van het zand-cement. Men zal namelijk een weerstand ondervinden die gelijk is aan de afschuifsterkte vermenigvuldigd met de manteloppervlakte van de cilinder die men wilt uittrekken. Door deze grote weerstand is het goed mogelijk dat men eerder een laagje zand-cement zal uittrekken dan echt een volledige cilinder. Zo komt men de huidtreksterkte te weten in plaats van de hechtsterkte. Als men er toch in slaagt om een cilinder uit te trekken, dan moet men altijd rekening houden met de bijdrage van de afschuifsterkte. Men bekomt dus geen zuivere hechtsterkte. Om die redenen lijkt de gebruikte proefopstelling aan te raden voor verdere proeven. Er moet evenwel een betonnen ondergrond met hogere treksterkte gebruikt worden.

6.3 Afschuiving tegel/lijm/zand-cement

6.3.1 Proefstukken

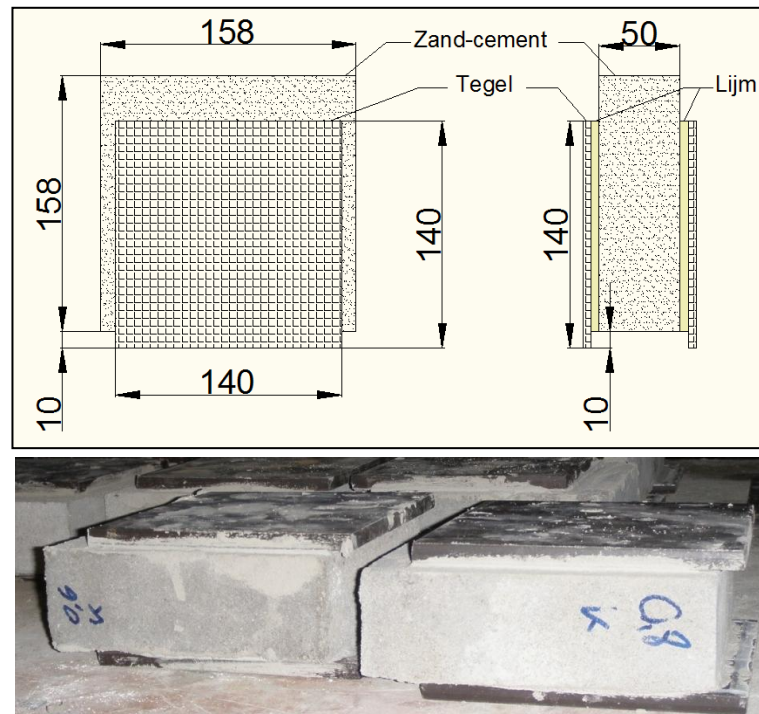
Er wordt gebruik gemaakt van 2 lijmsorten, namelijk "FLEXcement" en "P.T.B. Kleefcement Plus", beiden van de producent Compaktuna[41]. Ze hebben, volgens de in Bijlage L toegevoegde productfiches, hechtsterktes welke respectievelijk 1 en $0,5 \text{ N/mm}^2$ overschrijden. Deze waarden zijn zoals reeds vermeld in paragraaf 2.4.2 bekomen door testen uit te voeren op een ouderdom van 28 dagen. Omdat de vloer in de praktijk vermoedelijk eerder dan deze 28 dagen na het lijmen belast zal worden, werden de proeven ook hier vroeger uitgevoerd. De procedure die op de technische fiches vermeld staat, werd volledig nageleefd bij het vervaardigen van de proefstukken.

Een proefopstelling als in paragraaf 6.1 zou hier te complex zijn wegens de kleine dikte van de tegel. De kracht van de vijzel overbrengen op een smalle verdeelstrook welke enkel op de tegel aangrijpt en niet op de lijm, is zeer delicaat.

Daarom werd een andere opstelling bedacht. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van smalle prisma's uit zand-cement met afmetingen $50 \times 158 \times 158 \text{ mm}^3$. Deze zijn bekomen door het zeer voorzichtig verzagen van kubussen met zijde 158 mm waarbij er een kleine hoeveelheid vocht gebruikt is. De kubussen zijn verzaagd op een ouderdom van 18 dagen zodat het cement al gehydrateerd is. Deze

beperkte hoeveelheid vocht zal bijgevolg slechts een kleine invloed hebben op de water/cement-factor¹⁸.

De prisma's worden op onder- en bovenzijde belijmd met keramische tegels met oppervlakte 140x140 mm². Om onderstaande proef uit te voeren werden deze zo gelijmd dat ze beiden ten opzichte van dezelfde zijde 1cm verschoven zijn over de rand van het zand-cementprisma. Figuur 62 toont bovenaan de schematische tekening van de proefstukken in zij- en vooraanzicht.



Figuur 62: Proefstukken (bovenaan schematisch) ter bepaling van de afschuifsterkte zand-cement/lijm/tegel

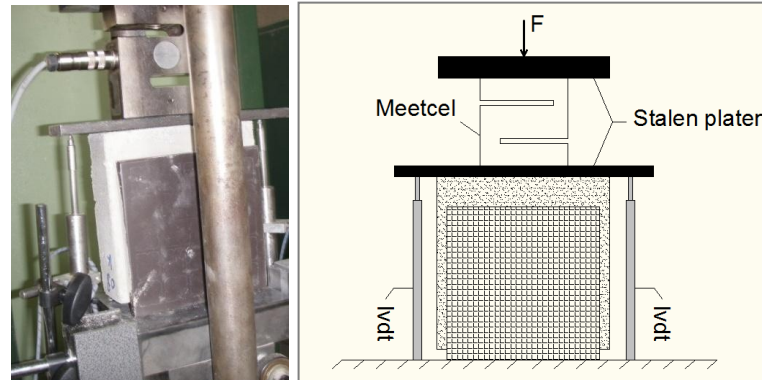
Er zijn in totaal 12 proefstukken gemaakt: voor elke lijmsort zijn er 3 proefstukken waarvan het zand-cementmateriaal een $W/C=0,6$ heeft en 3 met $W/C=0,8$. De proefstukken worden benoemd als "W/C - K of F - #" met K of F voor respectievelijk kleef- of flexcement.

6.3.2 Proefmethode

Om deze proefstukken aan afschuiving te onderwerpen worden ze rechtop in de handmatig te bedienen drukpers met capaciteit 200 kN geplaatst. De afschuifvlakken met oppervlakte 130x140 mm² staan aldus verticaal. Door de drukkracht die uitgespreid wordt over het bovenzijde van het zand-cementprisma, zal dit prisma tussen de tegels geperst worden. De enige weerstand wordt geboden door de lijmlaag welke de steunpunten, zijnde de tegels, verbindt met het zand-cementprisma. De

¹⁸ Bij de resultaten zal trouwens blijken dat de water/cement-factor amper invloed heeft op de afschuifsterkte.

kracht wordt opgevoerd tot er breuk optreedt. De breuk wordt hier gedefinieerd als het loskomen van één van de onderdelen van het proefstuk.

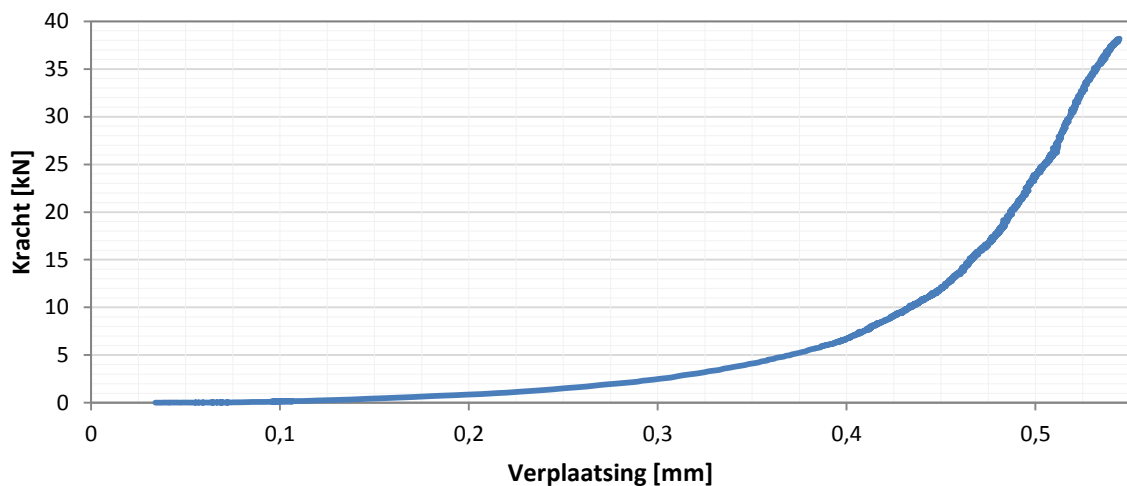


Figuur 63: Proefopstelling afschuifsterkte zand-cement/lijm/tegel

Figuur 63 geeft de proefopstelling op foto en schematisch. De stalen verdeelplaat heeft een breedte van 50 mm en is iets langer genomen dan 158 mm opdat langs weerszijden een lvdt geplaatst kan worden. Deze lvdt's registreren de verplaatsing van het zand-cementprisma ten opzichte van de tegels omdat ze op dezelfde plaat steun nemen als de tegels. Er wordt langs beide kanten een lvdt geplaatst zodat eventuele schuinstand uitgemiddeld kan worden. Door de bewaring van de proefstukken (Figuur 62 onderaan) is het prisma ten opzichte van de onderste tegel soms enkele mm verschoven. Om het prisma toch rechtop te kunnen plaatsen, werden er dunne stalen plaatjes (dikte 0,5 mm) geplaatst onder de tegel die minder dan 1cm uitsteekt als gevolg van deze verplaatsing. Deze verplaatsing was steeds miniem zodat de invloed op de resultaten beperkt is. De registratie van de kracht verloopt via een meetcel met capaciteit 50 kN.

6.3.3 Resultaten

Hieronder wordt het geregistreerde kracht/verplaatsingsdiagram weergegeven voor het proefstuk 0,6-F-1. De grafiek stopt waar er breuk optreedt. Het daaropvolgende – niet weergegeven – punt maakt geen deel meer uit van de curve omdat door de breuk de kracht plots afneemt en de verplaatsing plots toeneemt. Dit is echter te wijten aan het ineenvallen van de constructie zodat de verplaatsing niet meer overeenkomt met de relatieve verplaatsing van het zand-cementprisma ten opzichte van de tegel.



Figuur 64: Kracht/verplaatsingsdiagram van 0,6-F-1 bij de afschuivingsproef "zand-cement/lijm/tegel"

De wijze van breuk verschilt per proefstuk. Zo kan deze optreden aan één kant of aan beide kanten tegelijk. Als de breuk niet aan beide kanten tegelijk optreedt, kan dit te wijten zijn aan een lichte asymmetrie van de opstelling doordat één kant bijvoorbeeld net iets beter gelijmd is dan de andere. Ook het breukvlak varieert. Een eerste mogelijke breukvlak is in de lijm zelf. Hierbij blijft er lijm hangen aan zowel tegel als zand-cement. Het andere breukvlak is lijm/tegel. Dit houdt in dat de tegel loskomt van de lijm. Deze lijm blijft wel aan het zand-cement kleven. Onderstaande foto's tonen proefstukken na breuk met vermelding van het breukvlak.



Figuur 65: Breuk na afschuiving met links het breukvlak "lijm/tegel" en rechts het breukvlak in de lijm

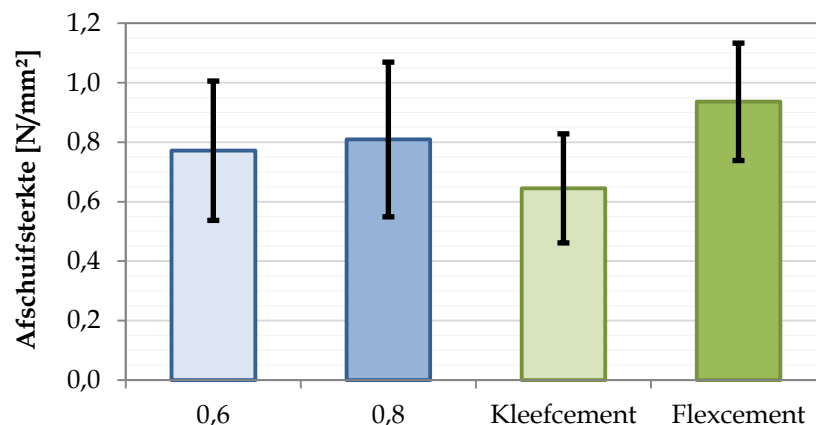
Het is bij geen enkel proefstuk voorgekomen dat de tegel tezamen met de lijm afbrak van het zand-cementprisma. De hechting tussen tegel en lijm is aldus zwakker dan deze tussen lijm en zand-cement. Om die reden werd de vergelijking gemaakt tussen de twee lijsoorten in plaats van tussen de beide water/cement-factoren. Tabel 34 geeft de resultaten van de uitgevoerde proeven. Hierbij wordt de afschuifsterkte bekomen door de bereikte kracht te delen door tweemaal het overlappende oppervlak tussen tegel en zand-cementprisma.

Tabel 34: Afschuifsterktes van een gelijmde tegel op zand-cement

	Kleefcement		Flexcement	
	Afschuifsterkte [N/mm ²]	Breukvlak	Afschuifsterkte [N/mm ²]	Breukvlak
W/C 0,6-1	0,829	Lijm/tegel, 2 kanten	1,048	Lijm/tegel, één kant
W/C 0,6-2	0,610	Lijm/tegel, 2 kanten	0,923	Lijm, 2 kanten
W/C 0,6-3	0,393	Lijm/tegel, één kant	0,827	Lijm, één kant
W/C 0,8-1	0,620	Lijm, beide kanten	1,226	Lijm, 2 kanten
W/C 0,8-2	0,884	Lijm, beide kanten	0,952	Lijm, één kant
W/C 0,8-3	0,534	Lijm, één kant	0,642	Lijm/tegel, één kant
Gemiddelde	0,645		0,936	

Zo kan geconcludeerd worden dat in deze proef voor kleefcement aan de eis van 0,5 N/mm² voldaan wordt. Voor flexcement wordt de vooropgestelde grens van 1 N/mm² (net) niet gehaald. Deze waarden zijn echter voor de lijm zelf bepaald en niet voor dit specifiek proefstuk. Uiteraard zal het met andere tegels nog andere waarden opleveren. Bovendien zijn de proeven uitgevoerd 3 dagen na het lijmen van de tegels. Aangezien de lijm een cementgebaseerd product is, zal de sterkte hiervan in verloop van de tijd toenemen. Bijgevolg zouden hogere waarden verkregen kunnen worden moest de proef op een later moment na het lijmen uitgevoerd worden of in een andere proefopstelling.

Vergelijkt men de gemiddelde afschuifsterktes voor beide zand-cementsamenstellingen, dan valt er een iets hoger gemiddelde vast te stellen voor W/C=0,8 (0,810 tegenover 0,772 N/mm²). De oorzaak van dit klein verschil is echter waarschijnlijker toe te wijzen aan de variatie van de proefresultaten dan aan de water/cement-factor zelf. Figuur 66 toont dit aan. De invloed van zowel water/cement-factor als lijmsoort op de afschuifsterkte wordt hierop uitgezet door weergave van de gemiddelde waarden met de standaardafwijking. Er is voor het verschil in lijmsoort een duidelijker sterkteverschil. De spreiding is in alle gevallen vrij groot. De intervallen $[\bar{x} - \sigma; \bar{x} + \sigma]$ hebben voor W/C=0,7 en 0,8 quasi gelijke grenzen. Daardoor is het moeilijker om voor het verschil in water/cement-factor conclusies te nemen, waar dit voor het onderscheid in lijmsoort wél mogelijk lijkt.



Figuur 66: Invloed van water/cement-factor en lijmsoort op de afschuifsterkte

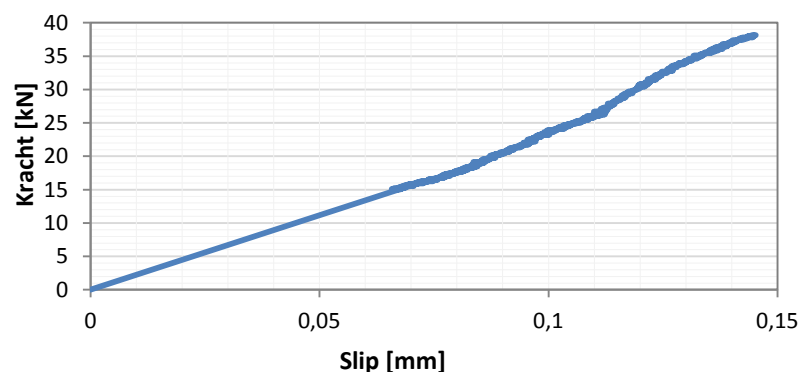
Er werd eveneens een betonnen prisma met tegels belijmd. Dit diende ter vergelijking en dus is hier voor beide lijmsoorten slechts 1 proefstuk gemaakt aangezien de kern van het onderzoek over zand-cement gaat. Voor flexcement werd een sterkte bekomen van 0,298 N/mm² en voor kleefcement 0,179 N/mm² zodat geconcludeerd kan worden dat de hechtsterkte met de zand-cementprisma's een pak

groter is. Het betreft hier slechts één proefstuk, maar het verschil is zo groot dat het duidelijk is dat de sterkte minder is voor beton. Dit komt door het veel gladdere oppervlak van deze betonnen prisma's in vergelijking met die van zand-cement. De oppervlakteruwheid is een bepalende factor voor de hechting tussen tegel en ondergrond, daarom dienen te gladde oppervlakken best ruwer gemaakt te worden vooraleer men de tegels plaatst. [7]

6.3.4 Theoretisch model

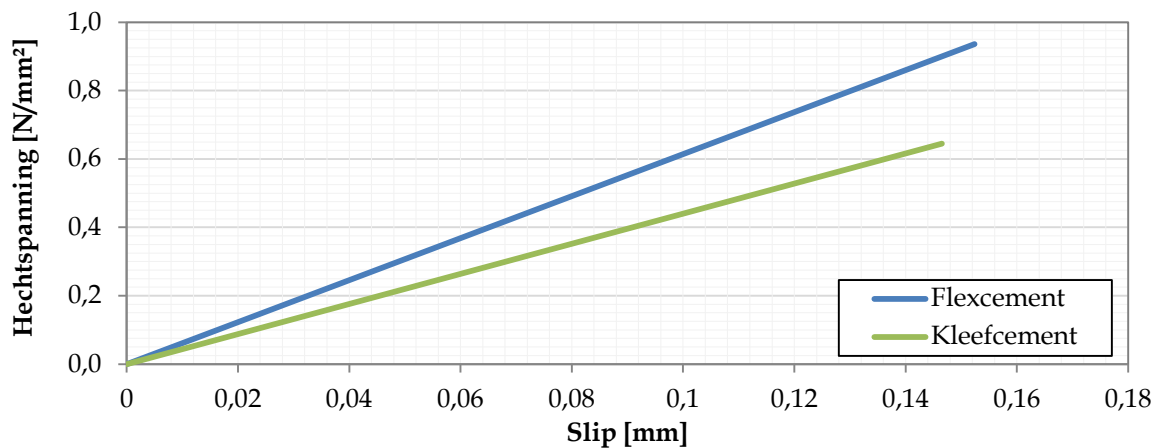
Figuur 64 toont een voorbeeld van een experimenteel bepaald kracht/verplaatsingsdiagram. Voor de andere proefstukken verloopt dit grotendeels gelijkaardig. De grote toename in verplaatsing voor kleine krachten is te wijten aan de proefopstelling. De verplaatsing wordt gemeten door lvd't's onder een stalen plaat die op het bovenzvlak van het zand-cement ligt. Dit bovenzvlak is niet perfect recht. Daarom zal de stalen plaat bij samendrukking eerst beter geklemd worden tussen proefstuk en drukpers. Tijdens dit proces zal meestal één van de twee lvd't's redelijk ver ingeduwd worden.

Dit eerste deel ten gevolge van de imperfectie van de proefopstelling zal weggelaten worden. Het tweede deel van de curve loopt quasi lineair. Lineariteit van de stijgende tak is een veel gebruikte aanname bij het opstellen van een theoretisch kracht/verplaatsingsdiagram. Het tweede deel is eveneens het laatste deel dat geregistreerd is. Een verplaatsingsgestuurde proef is aangewezen om de volledige curve op te kunnen stellen. Figuur 67 toont voor proefstuk 0,6-F-1 (volledige curve hiervan in Figuur 64) de curve die gebruikt zal worden om een theoretisch model te vinden voor de stijgende lineaire tak. Het begin is vervangen door een lineair gedeelte dat bepaald wordt door de lineaire trendlijn te bepalen door de proefresultaten na de fase waarbij de opstelling ingedrukt wordt. Zo ziet men dat een rechte aannemen voor de hele curve (tot aan breuk) zeker een goede benadering is. Men bekomt dan eveneens enkel de relatieve slip ten gevolge van effectieve afschuiving (en niet ten gevolge van samendrukking van de opstelling). In Bijlage M worden alle grafieken weergegeven vóór bewerking.



Figuur 67: Kracht/slipdiagram van 0,6-F-1 na linearisering van het begin

Het model bestaat enkel uit de eerste lineaire stijgende tak met weglating van de fase waarin de opstelling samengedrukt wordt. De tak begint in de oorsprong. Het eindpunt wordt bepaald door zowel maximale kracht als maximale slip uit te middelen. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen flex- en kleefcement en niet tussen de verschillende water/cement-factoren. Er wordt gerekend met de afschuifsterkte (in N/mm^2) en niet met de kracht (in kN).



Figuur 68: Theoretisch model. Stijgende tak voor afschuiving van een gelijkde tegel op zand-cement.

Figuur 68 geeft de bekomen rechten voor flex- en kleefcement. Dit moet voorzichtig gehanteerd worden voor verdere studies omdat er een grote spreiding is voor zowel slip als afschuifsterkte, maar het vormt wel een eerste indicatie. De gemiddelde waarden van de eindpunten worden gegeven in onderstaande tabel.

Tabel 35: Gemiddelde waarden van het eindpunt van de stijgende tak van het theoretisch model

	Slip [mm]	Afschuifsterkte [N/mm ²]
Flexcement	0,152	0,936
Kleefcement	0,147	0,645

6.3.5 Evaluatie proefopstelling

De proefopstelling geeft goede resultaten en tevens zijn er geen moeilijkheden bij het vervaardigen van de proefstukken. Daarom kan deze proefopstelling nog gebruikt worden voor verdere proeven. Het enige punt van mogelijke verbetering is het beter beletten van de beperkte verschuiving tussen zand-cement en tegel na het lijmen.

6.4 Hechting tegel/lijm/zand-cement

6.4.1 Proefstukken

Om de hechting te bestuderen van een gelijkde tegel op een zand-cementondergrond, werden onderstaande proefstukken gemaakt.



Figuur 69: Proefstuk van de hechtingsproef. Links: foto. Rechts: Schematisch bovenaanzicht

Op de kubussen werd een tegel gelijmd met afmetingen $8 \times 8 \text{ cm}^2$. Deze afmetingen werden zo bepaald dat de drie steunpunten van de dynamometer nog plaats kunnen nemen op de kubus zonder de tegel te raken. De reden waarom de tegel zo groot mogelijk genomen is, is omdat geen hoge hechtsterkte verwacht werd. Hoe groter het oppervlak genomen wordt, hoe groter de kracht is bij een bepaalde sterkte en om té kleine krachten te vermijden - wegens de onnauwkeurigheid van meten - werd de oppervlakte vergroot. In het midden van deze tegel wordt vervolgens met behulp van een hogesterktelijm een trekschijf gelijmd met diameter 50 mm. Bij het bedenken van de proefstukken werd er van uitgegaan dat de buiging van de tegel te verwaarlozen zou zijn wegens de kleine krachten.

Er zijn wederom twaalf proefstukken gemaakt. Van elke lijmsort werden er drie gemaakt voor een samenstelling met $W/C=0,6$ en drie met $W/C=0,8$. De tegels werden bij twee van de drie proefstukken in elke categorie op het ruwe afstrijkvlak gelijmd en bij de derde werd er gelijmd op één van de verticale bekistingsvlakken. Benaming gebeurt volgens " $W/C - F$ of $K - G$ of $R - \#$ " waarbij F en K weer slaan op flex- dan wel kleefcement en G of R hebben betrekking op een glad (of bekistings-) vlak of het ruwe afstrijkvlak.

6.4.2 Proefmethode

De proefmethode is hier niet zo complex als in voorgaande proeven. De dynamometer steunt met 3 poten op de randen van de zand-cementkubus. Dit toestel meet de kracht die nodig is om de trekschijf te verplaatsen ten opzichte van de kubus totdat breuk optreedt. Bij breuk zal een deel van het proefstuk meegetrokken worden met de trekschijf. De kracht wordt manueel met een zo uniform mogelijke snelheid opgevoerd. Figuur 70 toont de proefopstelling met een detail van de aansluiting tussen het toestel en de trekschijf.



Figuur 70: Proefopstelling voor hechting van een gelijmde tegel op zand-cement

6.4.3 Resultaten

Er wordt enkel een kracht geregistreerd. Deze wordt gedeeld door het gelijmde oppervlak om de hechtsterkte te bekomen. Er zijn twee soorten breukvlak. Meestal komt de tegel los van de lijm, maar bij twee proeven werd er een deel van het zand-cement mee getrokken. Er treedt geen breuk op in de laag tussen zand/cement en lijm en dus is deze hechtsterkte wederom niet bepalend.



Figuur 71: Breukvlakken bij hechtingsproef zand-cement/lijm/tegel. Links: tegel komt van lijm ("tegel/lijm"). Rechts: breuk zand-cement.

Het loskomen van het zand-cement is te verklaren door een lagere huidtreksterkte van het zand-cement dan de hechtsterkte tussen de verschillende materialen. Het is in beide gevallen bij een tegel gelijmd op het afstrijkvlak dat het vermelde fenomeen optreedt. Dit zal eerder voorkomen bij een afstrijkvlak dan bij een bekistingsvlak. Als men aan het afstrijkvlak trekt, zal men namelijk een laag van het zand-cement kunnen verwijderen evenwijdig met de verdichtingsvlakken. De oorzaak ligt dus niet in het ruwer zijn van dit oppervlak.

Tabel 36: Hechtsterkte van een gelijmde tegel op zand-cement

	Kleefcement		Flexcement	
	Hechtsterkte [N/mm ²]	Breukvlak	Hechtsterkte [N/mm ²]	Breukvlak
W/C 0,6-R-1	0,617	Tegel/lijm	0,797	Tegel/lijm
W/C 0,6-R-2	0,820	Tegel/lijm	0,672	Zand-cement
W/C 0,6-G-3	0,648	Tegel/lijm	0,930	Tegel/lijm
W/C 0,8-R-1	0,625	Tegel/lijm	0,555	Tegel/lijm
W/C 0,8-R-2	0,445	Zand-cement	0,648	Tegel/lijm
W/C 0,8-G-3	0,789	Tegel/lijm	0,836	Tegel/lijm
Gemiddelde	0,658		0,740	

Tabel 36 maakt duidelijk dat ook nu flexcement gemiddeld hogere sterktes geeft. Het verschil is echter veel kleiner dan bij afschuiving. De tegels voor deze proef zijn 7 (ipv 3 bij afschuiving) dagen op voorhand gelijmd. De vooropgestelde waarde op de productfiche wordt terug voor kleefcement wel en voor flexcement niet gehaald.

Vergelijkt men de gemiddelde sterktes voor variërende water/cementfactor enerzijds en voor oppervlakteruwheid anderzijds, dan verkrijgt men onderstaande resultaten.

Tabel 37: Gemiddelde hechtsterktes volgens water/cement-factor en oppervlakteruwheid

	W/C=0,6	W/C=0,8	Glad	Ruw
Gemiddelde hechtsterkte [N/mm²]	0,747	0,65	0,801	0,647

In tegenstelling tot wat uit vorige proeven blijkt, zal hier voor zowel W/C=0,6 als voor een glad oppervlak een hogere sterkte bekomen worden. Dit is tegen alle verwachtingen in en er kan dan ook moeilijk een verklaring bedacht worden. Aangezien de breuk echter meestal optreedt tussen de tegel en de lijm zijn deze resultaten te wijten aan toeval. Het verschil tussen “ruw” en “glad” is echter veel minder streng dan bij de betonplaten het geval was voor het hechtingsgedrag van zand-cement op beton. Een ruw en glad oppervlak zijn hier respectievelijk het afstrijk- of bekistingsvlak. Maar voor zand-cement zijn de bekistingsvlakken vrij ruw (in vergelijking met beton bijvoorbeeld) en tevens is het afstrijkvlak degelijk afgestreken zodat het verschil in oppervlakteruwheid echt beperkt is.

Er werd voor beide lijmsoorten een proefstuk gemaakt op betonnen ondergrond. Er is echter een klein verschil met de proefstukken uit zand-cement. Nu werd een cilindervormige tegel gelijmd (met dezelfde diameter als de trekschijf) in het midden van het bovenvlak van de betonnen kubus. De bereikte hechtsterkte is hoger dan bij de zand-cementproefstukken. Dit is nogmaals een onverwacht resultaat. Voor flexcement wordt 1,070 N/mm² gehaald en voor kleefcement 0,789 N/mm². Deze voldoen dus wel beiden aan de waarden in de productfiche. Het betreft uiteraard slechts één meting wat deze waarden niet erg representatief maakt. Het breukvlak was tweemaal tussen lijm en beton (Figuur 72).



Figuur 72: Breuk bij hechtingsproef van een gelijmde tegel op een betonnen kubus

Deze laatste resultaten kunnen echter wel een mogelijke uitleg bieden waarom deze van zand-cementproefstukken onlogisch en lager dan verwacht zijn. Het vermoeden dat de tegel niet aan buiging onderworpen zou worden tijdens deze proef kan fout zijn. De tegel gaat niet breken door deze buiging, maar de lijm is minder bestand tegen buiging dan tegen zuivere hechting of afschuiving. De sterktes met de betonnen proefstukken zijn groter en er treedt geen breuk op in het

vlak tussen lijm en tegel. De hechtsterkte tussen lijm en tegel zal dus hoger zijn dan men vermoedt op basis van de proeven met zand-cement. Anders zou bij de betonnen proefstukken breuk reeds moeten optreden in dit scheidingsvlak vooraleer de kracht kan toenemen tot een hogere waarde welke leidt tot breuk tussen lijm en beton.

6.4.4 Evaluatie proefopstelling

Er moet getracht worden om buiging van de tegel te vermijden. Dit kan gebeuren door cirkelvormige tegels te lijmen op de kubusvormige proefstukken. Het nadeel is natuurlijk dat een trekschijf met diameter 50 mm minder dan een derde in oppervlakte is van de hier gebruikte tegels. Voor een gelijke hechtsterkte zullen dus kleinere krachten nodig zijn, wat de nauwkeurigheid van de meting niet ten goede komt.

Als optimale oplossing lijkt het aangewezen om cirkelvormige tegels en trekschijven met diameter 100 mm te gebruiken. Zo kan er geen buiging van de tegel optreden én is de oppervlakte (en de bijhorende kracht) zelfs groter dan voor de vierkante tegels met zijde 80 mm.

De kubussen bleken sterk genoeg om als steunpunt te dienen voor de poten van de dynamometer. Op voorhand werd gevreesd dat de poten de zand-cementkubus zouden kapot duwen door de hogere hechtsterkte dan de lokale drukweerstand van het zand-cement. Dat is niet het geval en dus zou men in principe op elke zijde van de kubus een test kunnen uitvoeren.

Hoofdstuk 7

Analyse van de resultaten

In voorgaande hoofdstukken werden reeds alle resultaten weergegeven. Hier wordt verder ingegaan op de analyse van enkele resultaten met eveneens mogelijke verklaringen over de verschillende proeven heen. Er worden enkele opmerkelijke zaken en onderzochte fenomenen besproken.

7.1 Verdichting en volumemassa

Bij de standaardproeven die de invloed van de water/cement-factor nagaan, is er een algemene trend. Er treedt een verzwakking op in sterkte of althans een serieuze vermindering in sterkte toename vanaf een ouderdom van 14 dagen voor de proefstukken met $W/C=0,7$. De hoofdoorzaak kan gevonden worden in het feit dat alle proefstukken van de standaardproeven aangemaakt werden op vier verschillende data.

Tabel 38: Data waarop de proefstukken voor de standaardproeven gemaakt zijn

Datum	Gemaakte proefstukken
15/02/2012	$W/C=0,7$ voor ouderdom 14,28 en 56 dagen
16/02/2012	$W/C=0,8$ voor ouderdom 14,28 en 56 dagen
21/02/2012	$W/C=0,7$ voor ouderdom 1,2,3 en 7 dagen
27/02/2012	$W/C=0,8$ voor ouderdom 1,2,3 en 7 dagen

De proefstukken die getest werden op 14 dagen en meer behoren niet tot dezelfde mengeling als deze op jongere ouderdom. Zo kan het voorkomen dat er bij deze verschillende mengelingen een kleine variatie zat op de hoeveelheid toegevoegde materialen, al werd dit steeds nauwkeurig nagemeten en dus zal de fout hierop sowieso quasi nihil zijn.

De grootste invloed ligt in het feit dat de verdichtingsmethode voor de mengeling van 15 februari verschillend was dan deze voor de andere dagen. Er werd gebruik gemaakt van het gewicht van 5 kg om te verdichten. Voor alle andere mengelingen werd de verdichtingsstaaf gebruikt die als tweede van rechts is afgebeeld op Figuur 11. Deze verandering is puur uit praktisch standpunt doorgevoerd. Vooral voor de staande prisma's, maar ook voor de andere proefstukken is het een lastig karwei om talrijke proefstukken te verdichten met het gewicht van 5 kg. Bovendien is er voor de verdichting van zand-cement geen standaardpraktijk vastgelegd zoals bij de Proctorproef bijvoorbeeld. Daar is er duidelijk uiteengezet dat er x slagen met gewicht y vanop een hoogte z dienen te gebeuren. Zulke

regels zijn (nog) niet van kracht voor het verdichten van zand-cementproefstukken en dus was de verdichting sowieso reeds variabel waardoor verwacht werd dat de invloed van een andere verdichtingsstamper wel beperkt zou blijven. Niets blijkt echter minder waar te zijn.

Er werd bij het vervaardigen steeds getracht om zo uniform mogelijk te verdichten. Bij het bespreken van de Proctorproef werd echter al aangehaald dat een perfect gelijke verdichting niet realiseerbaar is. De variatie die aanwezig is bij de volumemassa's van de proefmengeling ter vergelijking van de vier water/cement-factoren en de daling van de volumemassa van $W/C=0,7$ (Figuur 33) zijn het gevolg van de onvermijdelijk veranderlijke verdichtingsgraad.

Deze proefstukken zijn nog allen op dezelfde dag gemaakt en het betrof kleine mengelingen zodat vermoeidheid bij het verdichten nog geen invloed kon hebben. Bij de grote mengelingen voor de standaardproeven is dit helemaal anders. De mengelingen zijn op verschillende dagen gemaakt (Tabel 38) én zijn hier veel groter zodat het niet onrealistisch is om te stellen dat de laatste proefstukken met een lagere kracht aangestampt zijn dan de eerste.

Het vermelde fenomeen vanaf 14 dagen kan hoofdzakelijk zijn oorsprong vinden in deze op voorhand onderschatte invloed van de verdichtingsmethode. Vandaar dat het enkel voor de proefstukken met $W/C=0,7$ is dat men hogere sterktes zou moeten hebben voor de oudere proefstukken. Dit verklaart waarom de resultaten van $W/C=0,8$ over deze van $W/C=0,7$ springen voor oudere proefstukken.

7.1.1 Verdichtingsgraad en - methode

Om te onderzoeken in welke mate verdichting een rol speelt voor de druksterkte¹⁹, werden voor $W/C=0,7$ en $0,8$ vier kubussen gemaakt met een "zachte" en "harde" verdichting. Zacht verdichten is slechts een paar keer lichtjes aanstampen om de stalen mal te vullen. Hard verdichten is elke dunne laag van het zand-cement stevig verhardend zodat een bijna maximale verdichting bekomen wordt. Tussen deze beide extremen bevinden zich de normaal verdichte proefstukken. Qua uitzicht is er reeds een onderscheid te zien tussen de verschillende kubussen. Naarmate de verdichting toeneemt, evolueert het beeld van een "verhard zandmengsel" tot iets dat men als een "betonkubus" zou kunnen aanzien (Figuur 73). Het uitzicht van de normale kubussen bevindt zich tussen deze twee, al zijn ze eerder gelijkend op de hard verdichte.



Figuur 73: Mate van verdichting. Links: zwak. Rechts: hard.

¹⁹ De invloed nagaan voor alle uitgevoerde proeven is helaas niet mogelijk in het tijdsbestek van 1 academiejaar. De druksterkte geeft evenwel reeds een zeer goede indicatie.

Logischerwijs is de volumemassa sterk afhankelijk van de verdichtingswijze. Onderstaande tabel geeft de gemiddelde volumemassa's weer van de kubussen samen met de variatiecoëfficiënt.

Tabel 39: Volumemassa's (na 28 dagen) in functie van de verdichtingsgraad

Verdichtingsgraad	W/C=0,7		W/C=0,8	
	Volumemassa [kg/m ³]	c_v	Volumemassa [kg/m ³]	c_v
Zacht	1791,15	0,0167	1794,05	0,0188
Normaal	1992,80	0,0124	2049,10	0,0052
Hard	2081,88	0,0066	2067,05	0,0030

Hard verdichten leunt aan tegen een maximale verdichtingsgraad. Daarom is deze manier van verdichten het eenvoudigst om uniform uit te voeren. De volumemassa's voor de hard verdichte zijn voor W/C=0,7 hoger dan voor W/C=0,8. Dit stemt overeen met het resultaat van de Proctorproef. Hiermee samenhangend kan er gezegd worden dat de volumemassa's voor een normale verdichtingsgraad voor W/C=0,7 een pak lager zijn dan deze voor W/C=0,8. Deze waarden kunnen dus aangewend worden om de vermoedens te bevestigen dat de verdichting bij de mengeling van 15 februari wel degelijk minder goed gebeurd is dan op de andere dagen. Dat een water/cement-factor van 0,7 namelijk leidt tot een optimale volumemassa wordt hier na de Proctorproef nogmaals bevestigd door de hard verdichte proefstukken. Voor een zachte verdichting zijn de volumemassa's wel degelijk lager voor W/C=0,7 maar een zachte verdichting is véél minder uniform uit te voeren dan een harde verdichting. Dit alles wordt eveneens aangetoond door de variatiecoëfficiënt. Voor beide mengelingen is het opvallend dat deze serieus afneemt naarmate de verdichting toeneemt. Voor een harde verdichting wordt de variatiecoëfficiënt zeer klein.

Deze kleine spreiding op de volumemassa's heeft niet noodzakelijk een kleine spreiding op de sterktes tot gevolg. Factoren zoals plaatselijk zwakkere doorsneden of oneffenheden op het te testen oppervlak bijvoorbeeld beïnvloeden eveneens de druksterkte. Dat er géén verband is tussen volumemassa en sterkte zou echter een understatement zijn. Dit wordt verderop aangetoond.

Uiteraard is het interessant om de sterktes van de verschillende verdichtingswijzen te vergelijken (Tabel 40). In de tabel worden eveneens de relatieve sterkte weergegeven ten opzichte van de normale verdichtingsgraad en de variatiecoëfficiënt.

Tabel 40: Druksterktes (na 28 dagen) in functie van de verdichtingsgraad

Verdichtingsgraad	W/C=0,7			W/C=0,8		
	$f_{ccub158}$ [N/mm ²]	Relatief	c_v	$f_{ccub158}$ [N/mm ²]	Relatief	c_v
Zacht	7,46	0,63	0,105	7,26	0,51	0,075
Normaal	11,92	1,00	0,074	14,11	1,00	0,029
Hard	17,00	1,43	0,049	16,16	1,14	0,061

Dat de hard verdichte kubussen een hogere sterkte zouden hebben, was te verwachten, maar dat de verschillen zo groot zouden zijn, kon moeilijk voorspeld worden. De zachte halen amper 63 en 51% van de sterkte van de normale. De harde zijn bovendien respectievelijk 43 en 14% sterker. Het feit dat dit laatste verschil voor een W/C=0,8 weer serieus kleiner is, is nogmaals een bewijs van de minder goede uitvoering van de normale kubussen met W/C=0,7. Deze is namelijk sterker in elke categorie behalve bij de normale proefreeks van 15 februari. Want voor een ouderdom tot en met 7 dagen haalden de proefstukken met W/C=0,7 een hogere sterkte dan W/C=0,8. Proefstukken met W/C=0,7 lijken dus sterker te zijn dan deze met W/C=0,8. Er werd hier slechts het gemiddelde beschouwd van

telkens 4 zachte en harde kubussen en dit enkel voor een ouderdom van 28 dagen. Tezamen met alle andere proeven op jongere ouderdom kan dit echter geen toeval zijn.

In de Hogeschool Gent hebben thesisstudenten heel het standaardproefprogramma uitgevoerd voor een andere samenstelling. Op een tussentijdse vergadering kon vastgesteld worden dat de kubusdruksterktes op 28 dagen ouderdom slechts een sterkte halen die rond de 5 à 6 N/mm² bedraagt. Er wordt in de Hogeschool Gent gewerkt met een andere samenstelling. Het zand is uiteraard niet van hetzelfde lot als dat van het laboratorium Magnel en bovendien bedraagt de water/cement-factor in hun samenstelling slechts 0,5. Deze lagere water/cement-factor en ander materiaal kunnen niet de enige verklaring zijn. In deze thesis werden in de proefopstelling immers eveneens vier kubussen gemaakt met W/C=0,496 en hier werd een gemiddelde sterkte bekomen van 12,21 N/mm².

De verdichtingsmethode is anders en dit zal wegens de enorme invloed van de verdichting de grootste oorzaak zijn. Er wordt een verdichtingsstaaf gebruikt met een verdichtingsoppervlakte gelijk aan de oppervlakte van de kubus. Zo wordt er telkens een verdichtingsvlak gecreëerd dat mooi evenwijdig loopt met het afstrijkvlak. Bij de proefstukken in het laboratorium Magnel werd er ook “om de 5cm verdicht”, maar dit gebeurde niet over met het afstrijkvlak evenwijdige vlakken. Op die manier wordt vermeden dat de kubus splijt in plaats van breekt bij de drukproef (Figuur 74).



Figuur 74: Verschil in breuk van de kubussen. Links: normaal. Rechts: splijt (foto van HOGent)

Het is duidelijk dat deze verdichtingsmethode wegens de splijtbreuk lagere sterktes tot gevolg heeft. De sterkte werd hier vergeleken met de proefresultaten van de eerste testsamenstellingen. Daar werd net als voor de samenstelling van 15 februari nog gebruik gemaakt van het verdichtingsgewicht van 5 kg. Daarom kan men nagaan wat het verschil is tussen de kubusdruksterktes voor W/C=0,7 en 0,8 en deze die later met de “echte” mengelingen verkregen werden. De ouderdom is verschillend (29 tegenover 28 dagen) en het zand is uit een ander lot genomen maar beide factoren zullen een beperkte invloed hebben. Tabel 41 geeft de gemiddelde sterktes aan.

Tabel 41: Kubusdruksterktes voor de verschillende samenstellingen

	W/C=0,7	W/C=0,8
Testsamenstelling in december [N/mm ²]	11,60	11,89
Eerste samenstellingen in februari [N/mm ²]	11,92	14,11

Zoals verwacht is het verschil voor W/C=0,7 tussen beide samenstellingen véél kleiner dan voor W/C=0,8. Dit komt eenvoudigweg omdat voor W/C=0,7 dezelfde verdichtingsmethode gehanteerd

werd ter bepaling van beide waarden. Voor $W/C=0,8$ werd in december het gewicht van 5 kg en in februari de verdichtingsstaaf gebruikt.

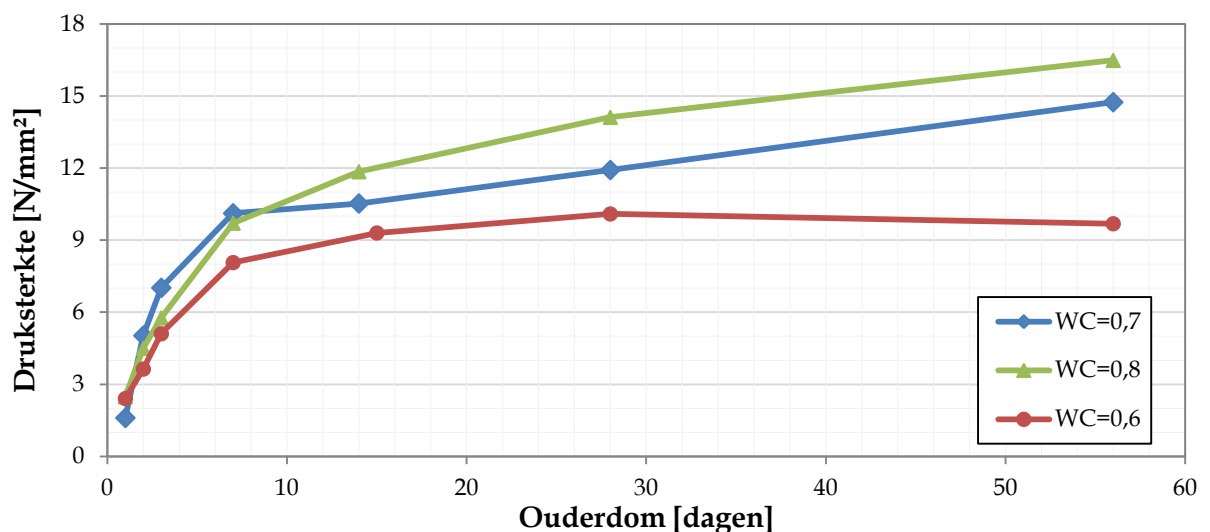
Dit is de meest logische verklaring en toont naast het belang van de verdichtingsgraad ook het belang van de verdichtingsmethode aan. Verdichtingsgraad en -methode hangen natuurlijk een beetje samen. Zo is het met elke methode meer of minder vanzelfsprekend dat een goede verdichting bekomen wordt.

Dat de proefresultaten van de proefstukken van 15 februari nu zinloos zouden zijn wegens de andere verdichtingsmethode (gewicht van 5kg), is niet waar. In de praktijk zal tevens een spreiding zitten op de manier van verdichten van de zand-cementlaag. Er moet gewoon in het achterhoofd gehouden worden dat er een verklaring is voor de lagere waarden. In feite zou er een translatie van de sterktes op 14,28 en 56 dagen kunnen gebeuren om zo een realistische curve te bekomen. Maar dit blindelings doen op basis van enkel deze proefresultaten zou onverantwoord zijn. Er bestaat nog steeds een kans dat hier door een speling op de verdichtingsgraad toevallig hogere waarden verkregen werden voor $W/C=0,7$.

7.1.2 Bruikbaarheid van andere proefresultaten

In eerste instantie was het de bedoeling om alle resultaten voor de zogenaamde standaardproeven te vergelijken met de eerder bekomen resultaten van de referentiesamenstelling met $W/C=0,6$ van het laboratorium Magnel. Uit voorgaande analyse blijkt echter een té grote invloed van verdichtingsgraad en -methode en het is onmogelijk dat beiden voor de referentiesamenstelling gelijk zijn aan de in deze thesis uitgevoerde proeven.

Eerder is met de testsamenstellingen (Figuur 10) aangetoond dat voor gelijke verdichting de druksterkte voor een $W/C=0,6$ duidelijk hoger is dan deze voor $W/C=0,7$ en $0,8$. Worden de resultaten van de referentiesamenstelling samen uitgebeeld met deze voor $W/C=0,7$ en $0,8$ dan verkrijgt men de volgende figuur.



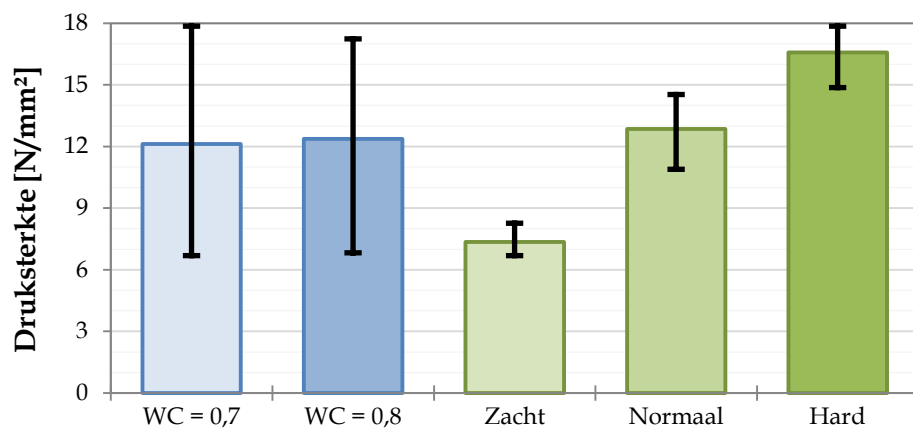
Figuur 75: Vergelijking van de kubusdruksterkte voor $W/C=0,7$ en $0,8$ met $W/C=0,6$ (referentiesamenstelling)

De resultaten voor $W/C=0,6$ zijn lager gelegen dan de rest. Dit spreekt de resultaten van de testsamenstellingen volledig tegen en daar was de verdichtingsmethode telkens hetzelfde. De resultaten van de referentiesamenstelling opnemen in het onderzoek zou niet toestaan om zinvolle conclusies te nemen wat betreft de invloed van de water/cement-factor. Hetzelfde kan gezegd worden over de resultaten van de proeven uitgevoerd in de Hogeschool Gent en de resultaten van de testsamenstelling. Trekt men deze lijn streng door, dan zou men eveneens de resultaten van $W/C=0,7$ moeten schrappen vanaf 14 dagen ouderdom.

Dit kan gemotiveerd worden door de proefresultaten uit te middelen door slechts één parameter (ofwel de water/cement-factor, ofwel de verdichtingsgraad) vast te houden en de andere te laten variëren.²⁰

Omdat er enkel voldoende gegevens zijn voor kubussen op een ouderdom van 28 dagen, zal deze kubusdruksterkte vergeleken worden. Figuur 76 geeft met behulp van de gekleurde staven de gemiddelde waarden weer. Tevens worden minimale en maximale waarden van de druksterkte voor elke eigenschap getoond.

Het doel van deze grafiek is om te bekijken wat er zou gebeuren als men de invloed van de water/cement-factor wil bepalen door voor elke water/cement-factor twaalf²¹ kubusdruksterktes te bepalen op een ouderdom van 28 dagen. Nu gaat men echter deze twaalf proefstukken op een willekeurige manier verdichten (zacht, normaal of hard). Als men dan naar de gemiddelde waarden zou kijken van beide water/cement-factoren, dan ziet men links op Figuur 76 het resultaat. Hieruit kan niet duidelijk bepaald worden welke water/cement-factor de hoogste sterkte oplevert en bovendien is er een enorme spreiding op de resultaten.



Figuur 76: Kubusdruksterktes op 28 dagen van alle proefstukken ifv slechts één eigenschap

²⁰ "Zacht" omvat bijvoorbeeld de kubusdruksterktes van alle zacht verdichte kubussen, zowel die met $W/C=0,7$ als die met $W/C=0,8$. En " $W/C=0,7$ " geeft dan de waarden van alle kubussen met $W/C=0,7$ en dit zowel van de zacht, normaal als hard verdichte kubussen. Dit geldt analoog voor elke categorie.

²¹ Voor $W/C=0,8$ zijn er maar 11 druksterktes bepaald, maar dat doet hier niet ter zake. Het idee telt.

Wilt men echter de invloed van de verdichting bekijken door voor elke verdichtingsgraad acht²² kubussen te vervaardigen en dit onafhankelijk van de samenstelling, dan wordt het rechtergedeelte verkregen van Figuur 76. In tegenstelling tot het linkergedeelte kan men hier wél conclusies trekken en wel zeer duidelijk, namelijk dat voor hogere verdichtingsgraad betere resultaten bekomen worden en bovendien dat een maximum van een lagere verdichtingsgraad steeds lager is dan het minimum van de hogere verdichtingsgraad zodat de grenzen duidelijk afgebakend zijn.

Uiteraard dient dit alles genuanceerd te worden omdat er qua verdichtingsgraad een veel grotere variatie (en dus duidelijker verschil in sterkte) is dan qua water/cement-factor. Het resultaat was vermoedelijk wel anders geweest als hier de water/cement-factoren 0,4; 0,8 en 1,2 bijvoorbeeld onderzocht werden. Maar toch kan hier nogmaals de invloed van de verdichting uit opgemaakt worden. Bovendien is er een beperkte invloed van een kleine variatie in water/cement-factor op de sterkte als de verdichting niet uniform uitgevoerd is. Ter volledigheid worden de gemiddelden, minima, maxima en variatiecoëfficiënten in tabelvorm uitgezet (Tabel 42).

Tabel 42: Kubusdruksterktes op 28 dagen van alle proefstukken ivf slechts één eigenschap

Eigenschap	Gem. [N/mm ²]	Min. [N/mm ²]	Max. [N/mm ²]	c_v [-]
W/C = 0,7	12,13	6,69	17,86	0,34
W/C = 0,8	12,36	6,83	17,24	0,34
Zacht	7,36	6,69	8,27	0,08
Normaal	12,86	10,90	14,54	0,10
Hard	16,58	14,87	17,86	0,06

Concluderend kan men zeggen dat proefresultaten die in het verleden of door andere personen bekomen zijn niet gebruikt kunnen worden ter vergelijking van de invloed van de water/cement-factor. Dit kan waarschijnlijk doorgetrokken worden naar andere eigenschappen van de samenstelling. Al kan het zo zijn dat het verschil daar niet zo opvallend is. Als de onderzochte parameter een groter effect op de resultaten heeft, zal afhankelijkheid van de verdichting minder opvallen. Hiermee wordt niet bedoeld dat sommige resultaten zinloos zijn, maar dat het moeilijk is om onderlinge verbanden te zoeken op basis van proefresultaten waarvan de proefstukken op verschillende wijze vervaardigd zijn.

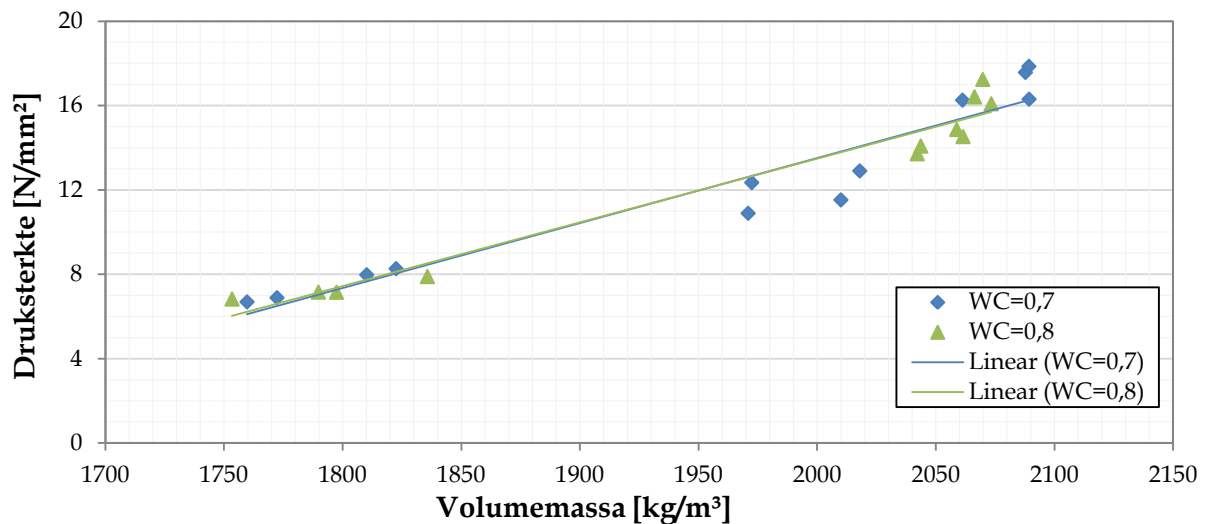
7.1.3 Verband tussen volumemassa en druksterkte

Uit paragraaf 7.1.1 is reeds duidelijk geworden dat er een verband bestaat tussen enerzijds de mate van verdichting en de volumemassa en anderzijds tussen de mate van verdichting en de druksterkte op 28 dagen. In deze paragraaf wordt nagegaan of er eveneens een verband kan afgeleid worden tussen de volumemassa en de druksterkte op 28 dagen.

In principe zou men de druksterktes van alle proefresultaten erbij kunnen halen om zo een verband te zoeken. Er is een belangrijke motivatie om dit niet te doen. Dit zal een vertekend beeld geven aangezien op jonge ouderdom de proefstukken een volumemassaverlies ondergaan, maar dat wordt

²² Voor "Normaal" zijn er maar 7 druksterktes bepaald, maar wederom is enkel het idee van belang.

volledig teniet gedaan door de toename aan sterkte door de verder geëvolueerde hydratatie. Deze verloopt niet evenredig met de afname aan volumemassa waardoor men verkeerdelijk zou concluderen dat afname van gewicht een toename van sterkte veroorzaakt. Om die reden zal het verband beschouwd worden voor proefstukken op dezelfde ouderdom. Er wordt hier gekozen voor proefstukken op ouderdom 28 dagen omdat dat de meest voorkomende ouderdom is in vergelijkende studies als het op sterkte aankomt. Bovendien zijn deze allen op zeer uiteenlopende wijze verdicht zodat het verband los van de invloed van de verdichting bestudeerd kan worden. Figuur 77 toont de verschillende waarden van het volumemassa/druksterkte-diagram.



Figuur 77: Druksterktes van kubussen met ouderdom 28 dagen in functie van de volumemassa's

Door deze resultaten werd met behulp van Excel een lineaire trendlijn getrokken. Deze lijn werd voor beide water/cement-factoren bepaald en wat toch wel opmerkelijk is, is dat deze twee rechten quasi gelijklopen. De vergelijkingen met hun R^2 -waarde zijn hieronder gegeven.

$$W/C=0,7 \quad f_{ccub158}(28) = 0,0308 * \rho - 48,090 \quad (R^2 = 0,9181)$$

$$W/C=0,8 \quad f_{ccub158}(28) = 0,0302 * \rho - 46,944 \quad (R^2 = 0,9587)$$

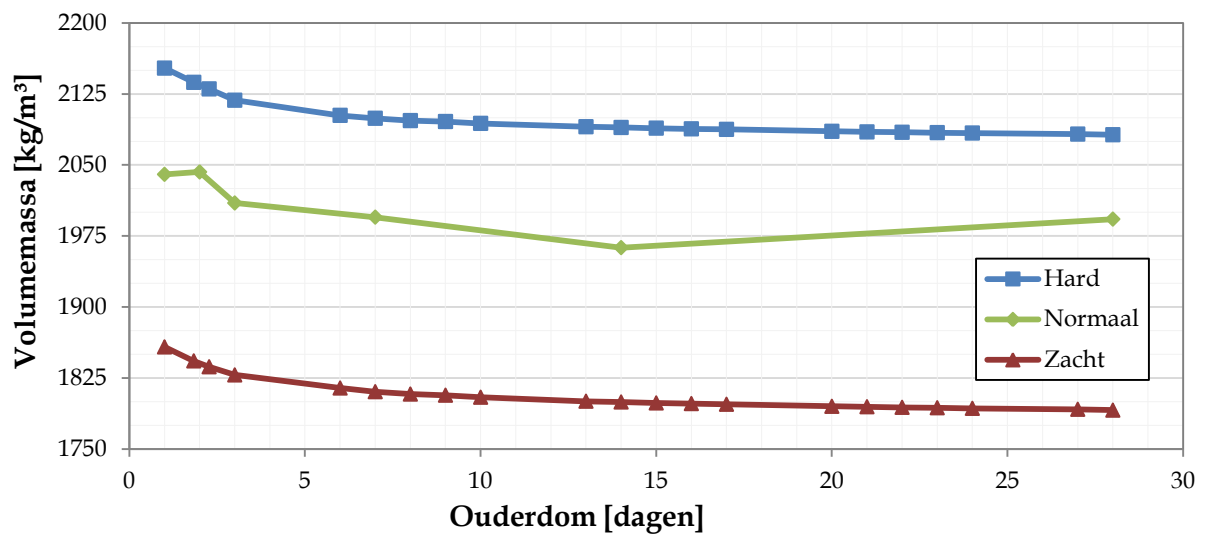
Met $f_{ccub158}(28)$ = kubusdruksterkte van kubussen met zijde 158 mm op 28 dagen [N/mm²]
 ρ = de volumemassa [kg/m³]

De R^2 -waarde geeft een beeld van de nauwkeurigheid van de formule. Hoe dichter deze de eenheid benadert, hoe correcter de curve de resultaten weerspiegelt. De R^2 -waarden zijn groter dan 0,9 wat duidt op een goede benadering. Bovendien zijn de vergelijkingen voor $W/C=0,7$ en $0,8$ quasi gelijk zodat het verband onafhankelijk van de water/cement-factor hetzelfde is. Op basis van deze resultaten kan men stellen dat er een verband bestaat tussen volumemassa en sterkte. Voor alle kubussen op ouderdom 28 dagen wordt volgende vergelijking met R^2 -waarde verkregen.

$$f_{ccub158}(28) = 0,0305 * \rho - 47,518 \quad (R^2 = 0,9376)$$

7.1.4 Uitdroging

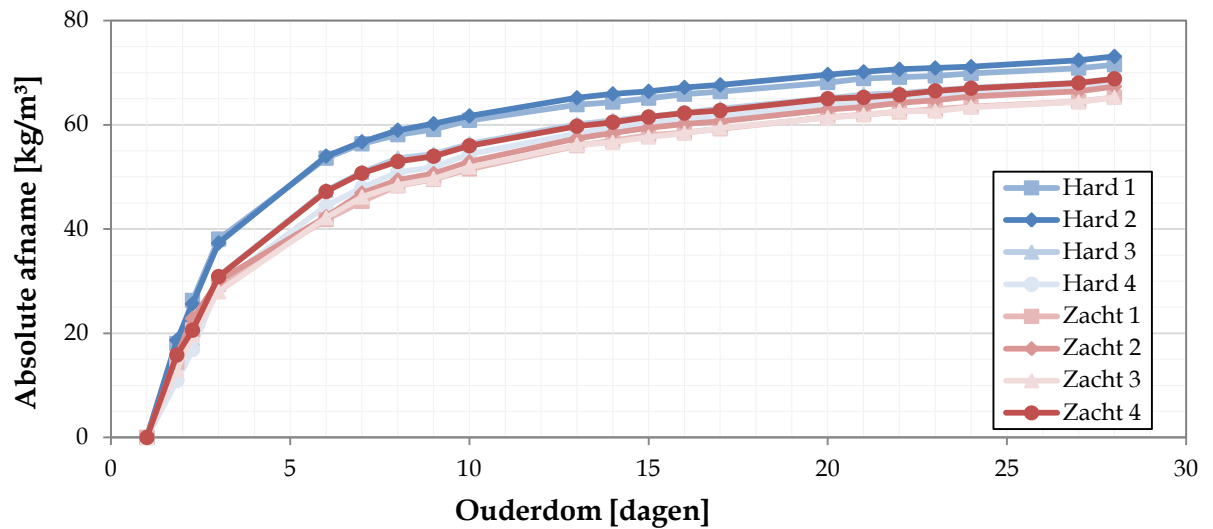
Verder werd van de proefstukken met water/cement-factor 0,7 dagelijks de volumemassa bepaald om de uitdroging te vergelijken tussen beide verdichtingsgraden. Voor het uitvoeren van een proef werd steeds het proefstuk gewogen zodat alle massa's gekend zijn van de normaal verdichte proefstukken op de onderzochte ouderdommen. Bijgevolg kunnen de uitgemiddelde volumemassa's weergegeven worden in functie van de ouderdom. Aangezien de kubussen met harde en zachte verdichting reeds na 28 dagen getest zijn, zijn de metingen hier gestopt.



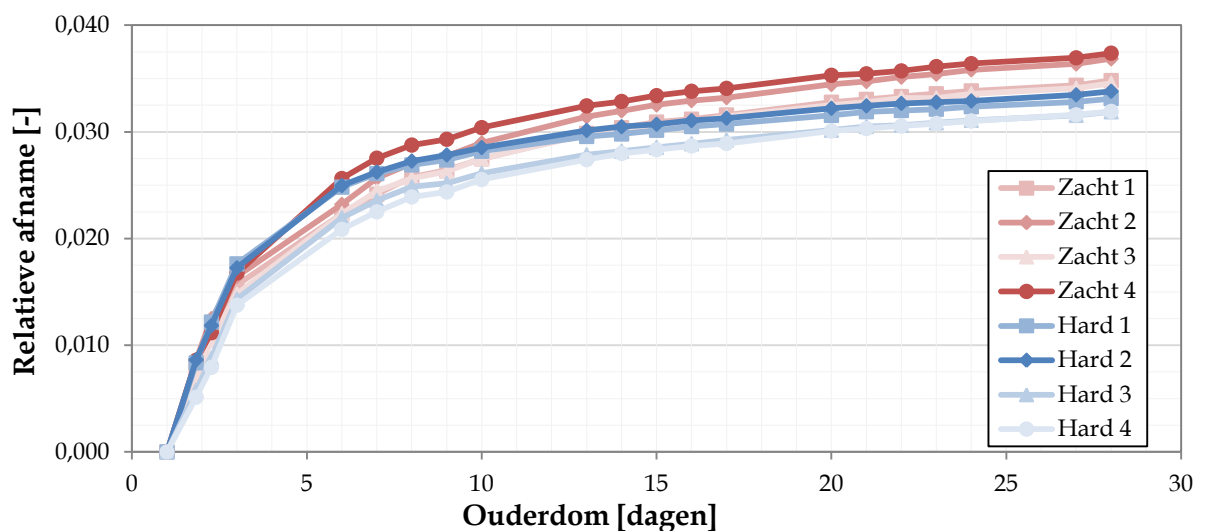
Figuur 78: Volumemassa's van kubussen met W/C=0,7 in functie van de ouderdom

Zoals te verwachten liggen deze curven allen op een verschillende hoogte en dit in een logische volgorde. De afname van de volumemassa is groter in het begin dan op het einde. De curve van de normaal verdichte kubussen vertoont een afwijkende vorm van de andere twee curves. Dit is te verklaren door de variatie in volumemassa van de verschillende proefstukken. Waar het voor de twee andere curves een weging van dezelfde kubus betreft, zijn dit voor de normaal verdichte kubussen massa's van verschillende proefstukken. Daarom is het om de uitdroging te bekijken vooral interessant om de curves te beschouwen van de hard en zacht verdichte kubussen.

Voor deze kubussen zijn zowel de absolute (Figuur 79) als de relatieve (Figuur 80) afname van de volumemassa uitgezet. De absolute afnames tonen grotere waarden voor de hard verdichte kubussen, maar dit is te verwachten aangezien ze nu eenmaal een grotere hoeveelheid materiaal bevatten na het vervaardigen. Op Figuur 80 kan men beter vergelijken welke hoeveelheid er verloren gaat ten opzichte van de initiële volumemassa. De kubussen die zacht verdicht zijn verliezen meer vocht ten opzichte van hun initiële volumemassa dan de hard verdichte exemplaren.



Figuur 79: Absolute afname van de volumemassa's voor kubussen met $W/C=0,7$



Figuur 80: Relatieve afname van de volumemassa's voor kubussen met $W/C=0,7$

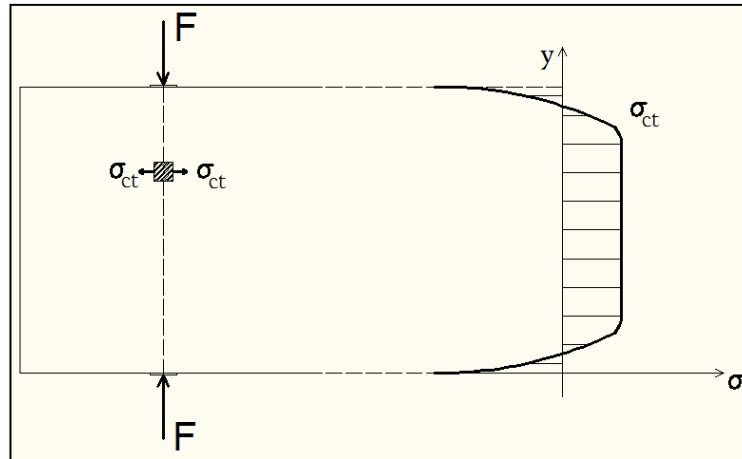
Het verschil tussen beiden is echter zeer beperkt. De mate van verdichting maakt weinig uit voor de uitdroging van de proefstukken. Er zal relatief gezien wel meer vocht verloren gaan bij de zacht verdichte kubussen, maar als er gekeken wordt naar het uitzicht van beide kubussen (Figuur 73) zou men verwachten dat dit verschil veel groter is.

7.2 Verschil buig- en splijttreksterkte

Omdat een zuivere trekproef moeilijk uit te voeren is, wordt ter bepaling van de treksterkte gebruik gemaakt van de splijtproef of de driepuntsbuigproef. Deze twee proeven worden hier nader toegelicht en het verschil tussen beide wordt bekeken.

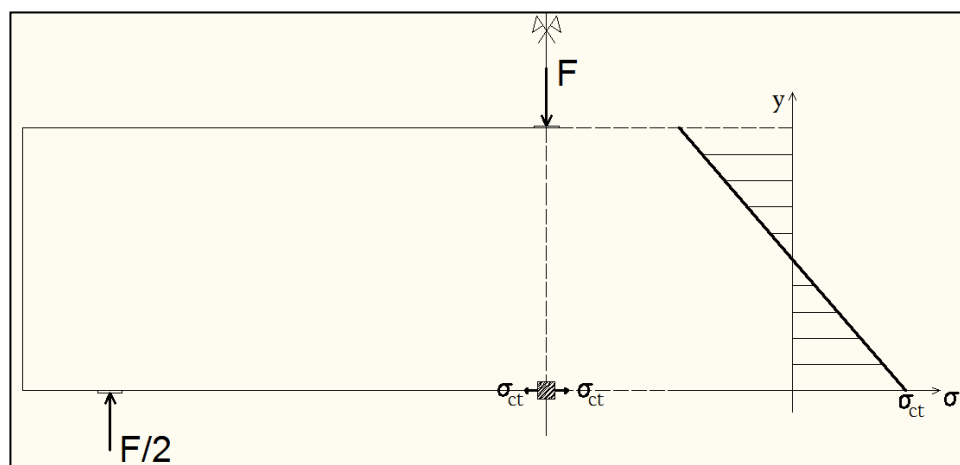
Met behulp van de splijtproef kan een treksterkte bepaald worden aangezien men vaststelt dat er door het belasten met een lijnlast aan onder- en bovenzijde van een proefstuk in het belaste vlak

trekspanningen ontstaan loodrecht op dit vlak (zoals weergegeven op Figuur 81). Deze trekspanningen zijn over het grootste gedeelte van het belaste vlak uniform. Er worden hogere sterktes verkregen dan voor de rechtstreekse trekproef omdat de doorsnede waarin het proefstuk belast wordt hier gekozen wordt en dus niet noodzakelijk de zwakste is. [36]



Figuur 81: Trekspanningen ten gevolge van de splijtproef ter plaatse van de belaste doorsnede

De driepuntsbuigproef zal trekspanningen opwekken in het proefstuk, zij het ditmaal enkel aan het onderste gedeelte van de doorsnede. Het spanningsdiagram verloopt lineair (Figuur 82). Enkel de onderste vezel is aan de grootste trekspanning onderworpen. De plaats waar het zand-cement belast wordt met de maximale trekspanning is nog kleiner dan bij de splijtproef. Analooq als daar vermeld, is het logisch dat de bekomen sterktes (nog) hoger uitvallen dan deze van de zuivere trekproef. Bovendien zullen de vezels, die vlak boven de onderste vezel gelegen zijn en niet even hard uitgerokken worden, de stabiliteit van deze onderste vezel bevorderen. Dit doet de sterkte verder toenemen. [36]



Figuur 82: Lineaire spanningsdiagram bij een driepuntsbuigproef

De norm NBN B 15-002 (1999) vermeldt onderstaande verbanden voor de treksterktes in het geval van beton. [36]

$$f_{ct} = 0,85 * f_{ct,sp}$$

$$f_{ct} = 0,6 * f_{ct,fl}$$

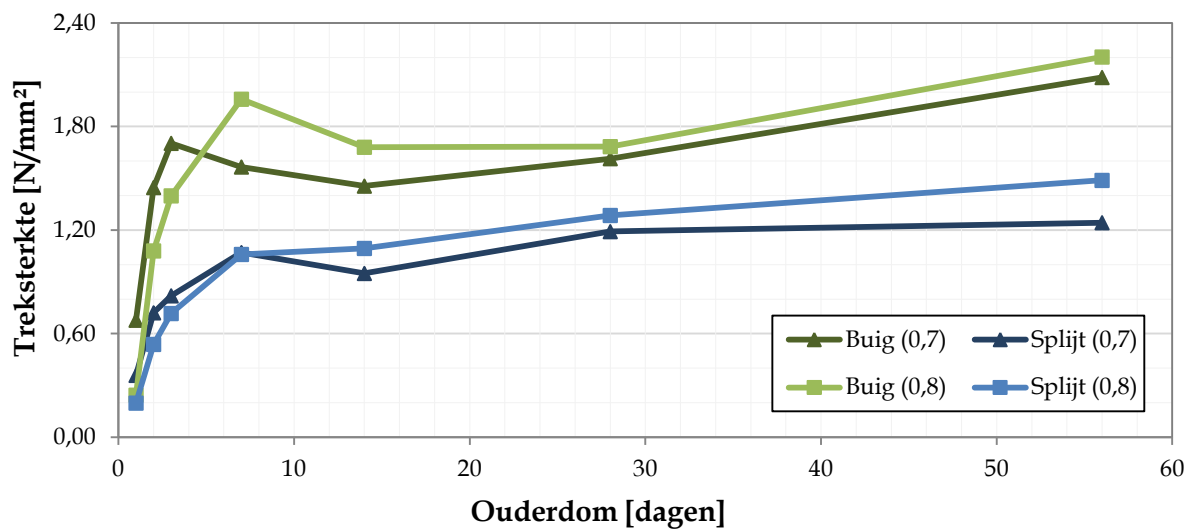
Met f_{ct} = de theoretische treksterkte van beton [N/mm²]
 $f_{ct,sp}$ = de theoretische splijttreksterkte van beton [N/mm²]
 $f_{ct,fl}$ = de theoretische buigtreksterkte van beton [N/mm²]

Gebruik makend van deze verbanden kan onderstaand verband afgeleid worden tussen splijt- en buigtreksterkte.

$$f_{ct,sp} = 0,71 * f_{ct,fl}$$

Over alle proefstukken heen bedraagt deze verhouding voor zand-cement gemiddeld 0,62. Deze waarde wijkt niet veel af van de theoretische verhouding.

Bij de treksterkte is op Figuur 83 een terugval in sterkte te zien.



Figuur 83: Buig- en splijttreksterkte voor water/cement-factoren 0,7 en 0,8 ifv de tijd

Er zijn hier twee zaken die de aandacht trekken. Enerzijds is er voor de buigtreksterkte voor W/C=0,8 een terugval te zien na 14 dagen waar dit bij andere proeven voor W/C=0,8 niet het geval is. Anderzijds is de terugval bij W/C=0,7 reeds op te merken op een ouderdom van 7 dagen. Beide rariteiten doen zich niet voor bij de resultaten van de splijtproef, welke nochtans met dezelfde proefstukken uitgevoerd werd. Hierdoor kan men stellen dat er naast de verschillende verdichtingsmethode nog een andere factor meespeelt.

De buigproef is sterk afhankelijk van de uitdroging. Dit kan verklaard worden door de krimp ten gevolge van de uitdroging. Door deze krimp zullen (kleine) krimp-scheuren ontstaan welke bij trekspanningen gemakkelijk verder scheuren omdat de buitenste schil onder de grootste trekbelasting komt. De buitenkant is rapper droog dan de binnenkant van het proefstuk. Onder andere om deze

eigenschap na te gaan voor zand-cement, zijn de vochtmetingen uitgevoerd. Hierop valt inderdaad te zien dat de relatieve vochtigheid aan de buitenkant veel rapper afneemt dan aan de binnenkant. Wat men ook uit Figuur 28 kan halen, is de vrij trage snelheid van uitdrogen (al dient hier rekening gehouden te worden met de vermelde onnauwkeurigheden bij deze proef).

Een verklaring voor de verzwakking die al na 7 dagen optreedt, moet gezocht worden in de uitdroging. Daarnaast weet men uit paragraaf 7.1.4 dat de verdichting (en dus de datum van vervaardiging) quasi onbelangrijk is voor deze uitdroging. Dit verklaart waarom de resultaten aanvankelijk steil toenemen (nog beperkte uitdroging, maar wel toenemende sterkte door hydratatie) om dan bij een water/cement-factor van 0,7 plots af te nemen bij een ouderdom van 7 dagen.

Ook voor $W/C=0,8$ is er een terugval in sterkte. Deze treedt op na 14 dagen. De proefstukken met $W/C=0,8$ bevatten meer vocht waardoor de uitdroging trager verloopt. De krimp-scheuren zullen na 7 dagen nog beperkt zijn in vergelijking met de reeds bereikte treksterkte. Na verdere uitdroging tot op 14 dagen, is er echter ook een verzwakking.

Bij de splijtproef wordt dan weer de hele doorsnede beproefd in plaats van enkel de uitgedroogde buitenste schil zodat hier geen abnormaal resultaat na 7 dagen te zien is voor $W/C=0,7$. Eveneens is er geen verzwakking in sterkte voor $W/C=0,8$.

7.3 Druksterkte in functie van de ouderdom

Voor de materiaaleigenschappen van beton zijn er reeds talrijke proeven gebeurd. Op basis van die proeven voor verschillende samenstellingen op verschillende ouderdom werd door Lambotte onderstaande formule bekomen voor de variatie van de druksterkte. Tevens wordt meteen de invloed van de verhardingssnelheid van het cement meegerekend om de veroudering van het proefstuk te laten meespelen. [20]

$$f_{ccub200}(t) = \beta_{cc}(t) * k * f_{cem}(28) * \left(\frac{C}{W} - k' \right)$$

Met $f_{ccub200}(t)$ = betondruksterkte van kubussen met zijde 200mm op tijdstip t [N/mm²]

$\beta_{cc}(t) = f_{cem}(t)/f_{cem}(28)$ [-]

$f_{cem}(28)$ = de druksterkte van het cement op 28 dagen ouderdom [N/mm²]

$\frac{C}{W} = 1/(\text{water/cement-factor})$ [-]

k en k' = parameters: voor beton door Walz gelijkgesteld aan 0,46 en 0,06 [-]

De druksterkte van het cement is bepaald met de genormaliseerde cementproef. Men stelt $f_{cem}(28) = 32,5$ N/mm². Het in deze thesis gebruikte cement CEM II/B-M 32,5 haalt minimaal deze sterkte. $\beta_{cc}(t)$ is de ouderdomscoëfficiënt en uit het betononderzoek werd onderstaande vergelijking verkregen.

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left[s * \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right]$$

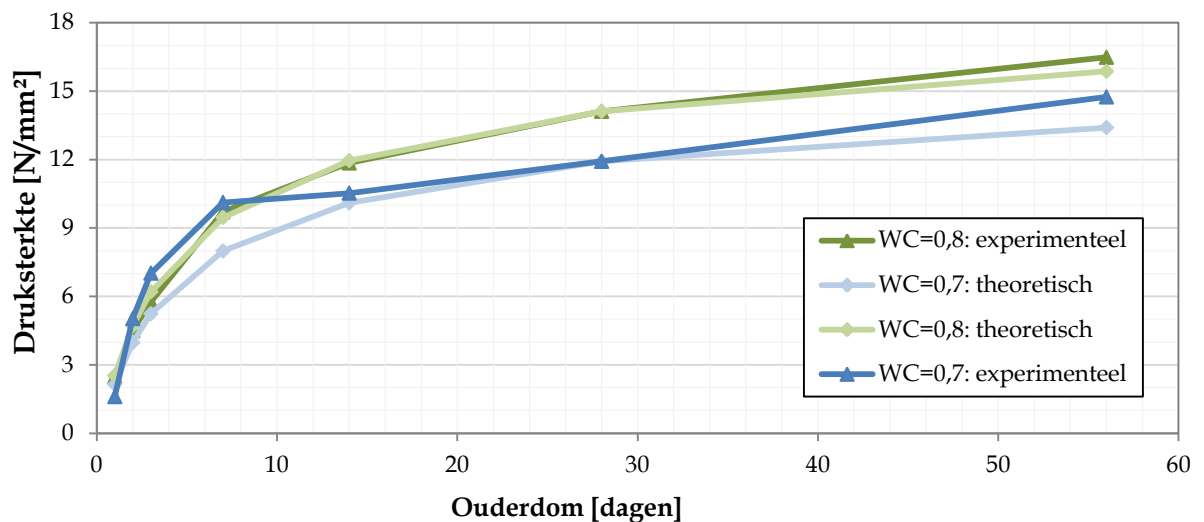
Hierin is s een variabele die beïnvloed wordt door de cementsoort. Het cement dat in deze thesis gebruikt is, is CEM II/B-M 32,5 en de waarde van s die daarmee overeenstemt bedraagt 0,40. Deze waarde uit de betontheorie wordt overgenomen voor zand-cement ook al zijn de proefstukken niet

bewaard bij een relatieve vochtigheid van ten minste 90% (voorwaarde voor de geldigheid van de formule volgens [20]).

De waarden voor de parameters k en k' werden door Walz bekomen door de best passende rechte doorheen alle proefresultaten te trekken in een diagram met als abscis en ordinaat respectievelijk C/W en $f_{ccub200}$.

Omdat de proefresultaten, zoals in paragraaf 7.1 aangetoond, enorm afhankelijk zijn van de verdichtingsgraad en -methode, zal het moeilijk zijn om hier de veroudering te bekijken van de samenstelling met $W/C=0,7$. Het tweede deel van de curve is vermoedelijk zwakker dan het zou zijn met eenzelfde verdichting als het eerste deel van de curve. Daarom kunnen enkel de waarden van $W/C=0,8$ gebruikt worden om na te gaan of er bij zand-cement een gelijkaardige veroudering is als beton.

Er wordt bijgevolg in eerste instantie gekeken naar de kubusdruksterkte in functie van de tijd. Deze wordt enkel met behulp van de ouderdomscoëfficiënt $\beta_{cc}(t)$ bepaald en niet in functie van W/C omdat er geen 'best passende rechte' te vinden is aangezien er aangenomen wordt dat er slechts één "correcte" reeks waarden bestaat (die met $W/C=0,8$).



Figuur 84: Experimentele tegenover theoretische druksterktes met ouderdomscoëfficiënt van beton

Figuur 84 geeft de curves weer van de experimenteel bepaalde druksterktes tezamen met theoretisch bepaalde druksterktes op basis van de experimentele waarde op 28 dagen ouderdom en de ouderdomscoëfficiënt van beton met $s=0,4$. De formule van deze grafieken is aldus de volgende.

$$f_{ccub158,th}(t) = f_{ccub158,exp}(28) * \exp \left[0,4 * \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right]$$

Met $f_{ccub158,th}(t)$ = de theoretisch bepaalde waarden voor de druksterkte van kubussen met zijde 158mm aan de hand van bovenstaande formule [N/mm²]

$f_{ccub158,exp}(28)$ = de experimenteel bepaalde sterkte op 28 dagen [N/mm²]

Tabel 43: Experimentele tegenover theoretische druksterktes met ouderdomscoëfficiënt van beton

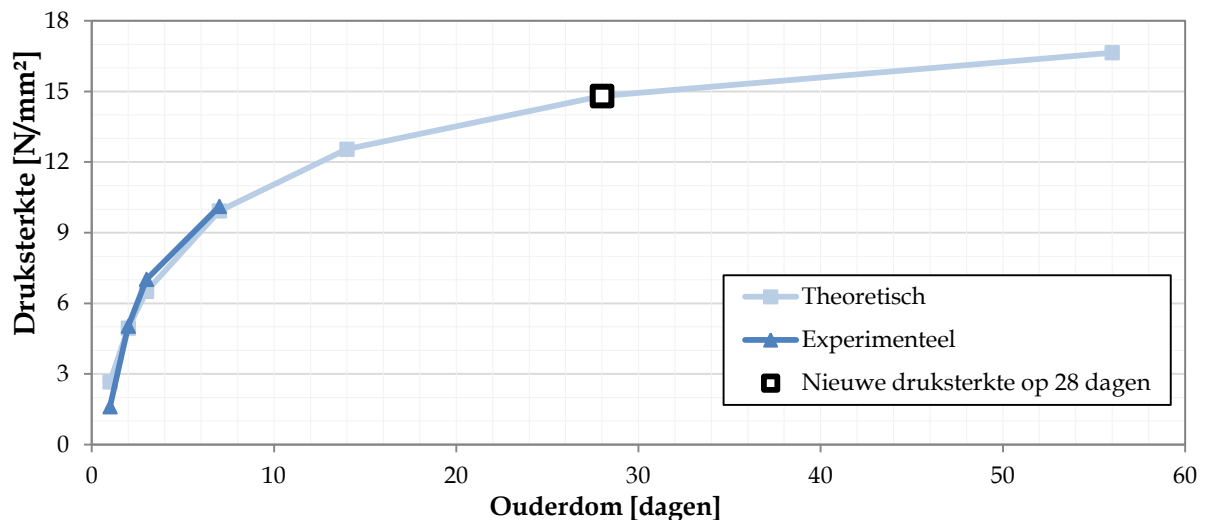
Ouderdom [dagen]	W/C=0,7		W/C=0,8	
	$f_{ccub158,exp}$ [N/mm ²]	$f_{ccub158,th}$ [N/mm ²]	$f_{ccub158,exp}$ [N/mm ²]	$f_{ccub158,th}$ [N/mm ²]
1	1,61	2,14	2,48	2,54
2	5,03	3,98	4,50	4,71
3	7,02	5,24	5,76	6,20
7	10,12	7,99	9,71	9,46
14	10,53	10,10	11,85	11,96
28	11,92	11,92	14,11	14,11
56	14,74	13,40	16,48	15,87

De overeenkomst tussen theoretische en experimentele waarden voor W/C=0,8 is zeer goed. Uiteraard is dit niet perfect aangezien een theoretische curve nooit helemaal gelijk zal lopen met experimenteel bepaalde waarden. Voor W/C=0,7 valt dan weer op dat de gelijkensis ver te zoeken is. De theoretische waarden zijn lager dan de experimentele. Dit was natuurlijk te verwachten aangezien de druksterkte op 28 dagen ouderdom met een betere verdichting hoger zou zijn.

Aangezien het verband voor W/C=0,8 wél lijkt te kloppen, zal tóch getracht worden om - zuiver theoretisch - een nieuwe fictieve waarde te zoeken voor de druksterkte voor W/C=0,7 op 28 dagen ouderdom. Als basis gelden de proefresultaten voor de verschillende verdichtingsgraden. Er wordt aangenomen dat de verdichtingsgraden "zacht" en "hard" uniform uitgevoerd zijn. Dan kan met behulp van interpolatie uit Tabel 40 de nieuwe druksterkte voor W/C=0,7 bepaald worden voor een normale verdichtingsgraad.

$$0,7N_{nieuw} = \frac{0,8N - 0,8Z}{0,8H - 0,8Z} * (0,7H - 0,7Z) + 0,7Z = 14,81N/mm^2$$

N,H en Z staan voor normaal, hard en zacht verdicht. Figuur 85 toont de experimenteel bepaalde waarden tot ouderdom 7 dagen, de fictieve waarde voor 28 dagen ouderdom en de nieuwe theoretische curve. Deze theoretische curve is gebaseerd op de fictieve druksterkte op 28 dagen ouderdom. De gelijkensis is ditmaal zeer groot voor de "echte" waarden op jonge ouderdom.



Figuur 85: Experimentele tegenover theoretische druksterktes met ouderdomscoëfficiënt van beton op basis van de nieuwe waarde op 28 dagen voor W/C=0,7

Tabel 44: Experimentele tegenover theoretische druksterktes met ouderdomscoëfficiënt van beton op basis van de nieuwe waarde op 28 dagen voor $W/C=0,7$

Ouderdom [dagen]	W/C=0,7	
	$f_{ccub158,exp}$ [N/mm ²]	$f_{ccub158,th}$ [N/mm ²]
1	1,61	2,66
2	5,03	4,95
3	7,02	6,51
7	10,12	9,93
14	-	12,55
28	14,81	14,81
56	-	16,65

Deze goede overeenkomst is een extra motivatie om aan te nemen dat de sterktes voor $W/C=0,7$ hoger verwacht mogen worden als ze met de nieuwe verdichtingsmethode zouden gemaakt worden. Hiervan uitgaande kan gesteld worden dat voor beide water/cement-factoren de ouderdomscoëfficiënt van beton gebruikt kan worden om de veroudering weer te geven. Er is dus enige overeenkomst met de sterkte-toename in de tijd tussen zand-cement en beton als er enkel gekeken wordt naar de invloed van de ouderdom met β_{cc} . Men kan beslissen om voor verder onderzoek enkel uit te gaan van de druksterkte op 28 dagen ouderdom. Zo zou men zich met een zelfde hoeveelheid werk en materiaal kunnen concentreren op meer variatie in samenstelling in plaats van variatie in ouderdom. Al dient men op te letten met deze conclusie omdat er voor $W/C=0,7$ gebruik gemaakt wordt van een fictieve waarde.

De overeenkomst met beton kan trouwens niet doorgetrokken worden door te stellen dat de vergelijking van Lambotte in het begin van de paragraaf geldig is met de gegeven waarden voor k en k' . De waarden voor k en k' bedragen voor zand-cement 0,12 en -2,37 als er gekeken wordt naar beide water/cement-factoren en de nieuwe waarde voor de druksterkte voor $W/C=0,7$.

Vergelijkt men de verhouding tussen de druksterkte voor $W/C=0,7$ (zowel de nieuwe als de oude) en $W/C=0,8$ met de gemiddelde theoretische verhouding van beton op 28 dagen ouderdom voor de verschillende theoretische druksterktemodellen in paragraaf 2.3, dan ziet men geen overeenkomst. Theoretisch werd een gemiddelde van 1,23 bekomen maar in de experimenten is er voor 28 dagen ouderdom een verhouding van 0,84. Veronderstelt men dat de nieuwe waarde voor $W/C=0,7$ geldig is, dan wordt een verhouding in sterkte van 1,05 verkregen welke nog steeds heel wat lager is dan de waarde voor beton.

Er kan gesteld worden dat de invloed van een hogere water/cement-factor voor zand-cement niet hetzelfde grote nadelige effect heeft als voor beton. Althans niet voor water/cement-factoren van deze grootteorde. Het is goed mogelijk dat men voor nóg hogere water/cement-factoren wél een grotere terugval in sterkte zal zien.

7.4 Vormfactoren

Omdat zowel de druksterkte als de buigtreksterkte uitgevoerd zijn voor proefstukken met variërende afmetingen, kan er eens gekeken worden naar de vormfactoren die van toepassing zijn voor het zand-cement.

7.4.1 Druksterkte

Er zijn druksterktes bepaald voor kubussen met zijde 158 mm, voor cilinders met hoogte 300 mm en diameter 150 mm en voor prismahelften met hoogte 40 mm en drukvlak 40x40 mm². Er worden uitgemiddelde waarden weergegeven van beide samenstellingen.

Tabel 45: Vormfactoren voor druksterkte in functie van de ouderdom

Ouderdom [dagen]	$\frac{f_{ccub158}}{f_{ccil}}$	$\frac{f_{ccub158}}{f_{cprismahelft}}$	$\frac{f_{ccil}}{f_{cprismahelft}}$
1	0,88	1,07	1,26
2	1,24	0,86	0,70
3	1,24	0,91	0,74
7	1,28	0,87	0,68
14	1,34	1,02	0,76
28	1,51	1,16	0,77
56	1,54	1,21	0,79
Gemiddelde	1,29	1,01	0,81

De vormfactor wordt bepaald als het gemiddelde van de waarden voor elke ouderdom. De waarden per ouderdom zijn bepaald als het gemiddelde van de verhouding voor alle proefstukken. De spreiding op deze waarde is uiteraard zeer groot, maar dat is eigen aan vormfactoren. Ook voor beton is er een redelijke spreiding aanwezig en dit zelfs voor veel grotere proefreeksen. NBN B15-220 geeft evenwel een formule die opgesteld is uit de resultaten van zulke grote proefreeksen en welke voor beton met enige voorzichtigheid gebruikt kan worden om richtwaarden te geven voor de vormfactoren. [20]

$$\frac{f_{cx}}{f_{ccub200}} = 0,65 + \frac{0,7}{\left(1 + \frac{\sqrt{A}}{200}\right) * \left(\frac{h}{\sqrt{A}}\right)^{1,05}}$$

Met f_{cx} = de druksterkte van een proefstuk met hoogte h en oppervlakte A [N/mm²]

$f_{ccub200}$ = de druksterkte van een kubus met zijde 200mm [N/mm²]

h = de hoogte van het proefstuk [mm]

A = de doorsnede van het proefstuk loodrecht op de drukrichting [mm²]

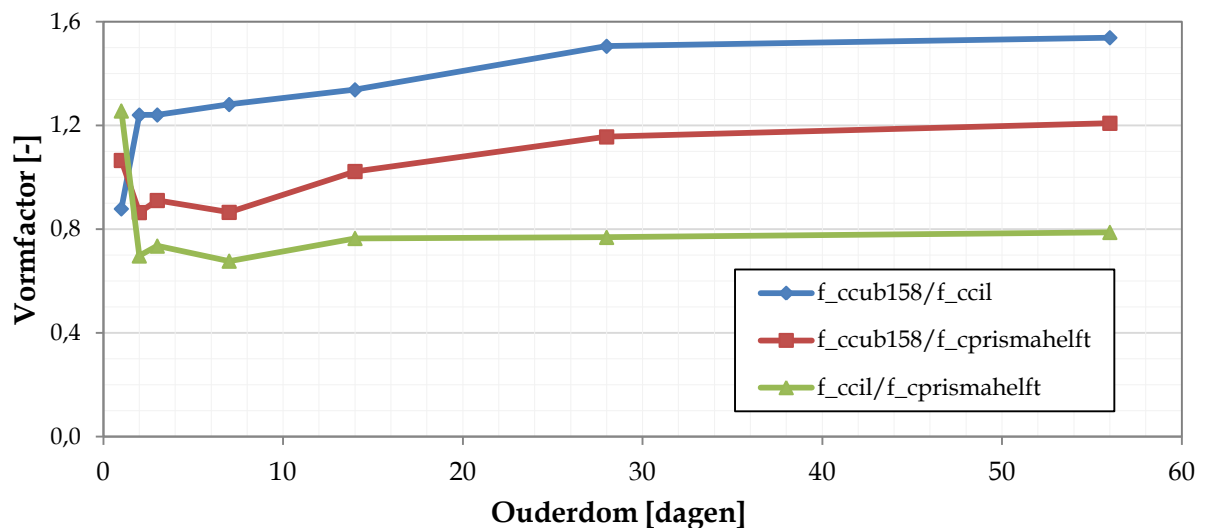
Aangezien in het proefprogramma geen kubussen met zijde 200mm, maar wel met zijde 158mm zijn, zal deze eerste waarde eenvoudig weggedeeld worden. Tabel 46 toont zowel de hierboven experimenteel bepaalde gemiddelden als de vormfactoren die voortkomen uit de empirische formule die voor beton bepaald werd. Er wordt van uitgegaan dat ze geldig is voor proefstukken met elke ouderdom zodat men de vergelijking kan maken voor een groter aantal resultaten.

Tabel 46: Vergelijking tussen experimenteel bepaalde en theoretische (voor beton) vormfactoren

	$\frac{f_{ccub158}}{f_{ccil}}$	$\frac{f_{ccub158}}{f_{cprismahelft}}$	$\frac{f_{ccil}}{f_{cprismahelft}}$
Experimenteel	1,29	1,01	0,81
Theoretisch	1,26	0,84	0,67

Er kan geconcludeerd worden dat, rekening houdend met de grote spreiding die steeds aanwezig is bij vormfactoren en de beperkte omvang van de hier uitgevoerde proeven, deze vormfactoren vrij dicht bij elkaar gelegen zijn. In ieder geval zijn ze van dezelfde grootteorde en is er enkel bij de vormfactor van kubussen met zijde 158mm ten opzichte van de prismahelften onenigheid over welke nu net de sterkste zijn. Omdat de experimenteel bepaalde waarde maar net de eenheid overschrijdt, is dit verschil te aanvaarden.

In [20] is sprake van een betononderzoek waarbij vastgesteld werd dat de verhouding $\frac{f_{ccub200}}{f_{ccil}}$ toeneemt als de ouderdom toeneemt. Dit geldt zoals te zien in Tabel 45 eveneens voor de waarden bekomen in dit onderzoek. Ook de andere vormfactoren hebben eerder de neiging om toe te nemen in functie van de ouderdom, al zijn er hier tevens enkele dalingen te vinden. Figuur 86 geeft dit grafisch weer.



Figuur 86: Vormfactoren in functie van de tijd

7.4.2 Buigtreksterkte

De driepuntsbuigproef werd uitgevoerd voor kleine en grote prisma's met respectievelijk afmetingen $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ en $600 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$. Zoals te verwachten is, zijn de buigtreksterktes van de kleine prisma's groter dan deze van de grote prisma's. Dit is te wijten aan het feit dat de kans op een zwakke plaats in het proefstuk stijgt als het volume van de proefstukken toeneemt. Ook bij de druksterktes werd deze eigenschap van het "size effect" duidelijk. Tabel 47 toont de gemiddelde waarden van de vormfactoren voor de buigproef.

Tabel 47: Vormfactoren voor buigtreksterkte in functie van de ouderdom

Ouderdom [dagen]	$\frac{f_{\text{buigprisma160}}}{f_{\text{buigprisma600}}}$
1	1,70
2	1,24
3	1,14
7	1,39
14	1,72
28	1,69
56	1,31
Gemiddelde	1,46

De onderste vezel van het prisma dat onderworpen wordt aan een driepuntsbuiging wordt gesteund door de erboven gelegen vezels. Dit sterktebevorderend verschijnsel is groter als de hoogte kleiner is. Er is een formule die een theoretische waarde ter vergelijking kan geven. Men dient echter rekening te houden met volgende beperkingen. De formule is bepaald voor betonnen proefstukken, voor een vier- in plaats van driepuntsbuigproef én ze is slechts geldig als de hoogte h minstens 50 mm bedraagt. Omdat ze hier enkel gebruikt wordt ter bepaling van een richtwaarde wordt ze toch even toegepast – bovenstaande bezwaren in het achterhoofd houdende. Er wordt van uitgegaan dat de formule geldig is voor elke ouderdom.

$$f_{ct} = f_{ctfl} * \frac{1,5 * \left(\frac{h}{h_0}\right)^{0,7}}{1 + 1,5 * \left(\frac{h}{h_0}\right)^{0,7}}$$

Met f_{ct} = de treksterkte [N/mm²]
 f_{ctfl} = de buigtreksterkte [N/mm²]
 h en h_0 = respectievelijk de werkelijke hoogte en referentiewaarde 100mm [mm]

Door wegdeling van de waarde f_{ct} kan de verhouding van f_{ctfl} voor prisma's met hoogtes 40 mm en 150 mm bepaald worden en verkrijgt men de theoretische vormfactor.

$$\frac{f_{\text{buig160}}}{f_{\text{buig600}}} = 1,51$$

Deze is van dezelfde grootteorde als de experimenteel bepaalde waarde.

7.5 Hechting

7.5.1 Zand-cement op betonnen ondergrond

Uit deze proeven blijkt uit de afschuifsterktes duidelijk de invloed van enerzijds de water/cement-factor en anderzijds de oppervlakteruwheid. Hoe vochtiger het zand-cement en hoe ruwer de betonnen ondergrond, hoe hoger de benodigde kracht was om de zand-cementlaag te kunnen afschuiven. De hechtsterktes geven helaas geen representatieve waarden, maar als men hier heel voorzichtig toch conclusies uit kan trekken zijn het wel de volgende. Het zal geen toeval zijn dat het

nét de proefstukken met $W/C=0,6$ op een gladde ondergrond zijn die allen kapot gaan door eenvoudig opheffen van de zand-cementlaag. Deze soort is namelijk ook veruit het zwakste bij afschuiving. Verder is de grootste bekomen sterkte verkregen voor een proefstuk met $W/C=0,8$ op een ruwe ondergrond. Hieruit conclusies trekken is echter nog iets gevaarlijker aangezien er bij de proefstukken op ruwe ondergrond amper breuk optrad in de hechtingslaag en dus zoals vermeld enkel sprake kan zijn van minimale sterktes. Desalniettemin is voor één proefstuk $W/C=0,6$ breuk opgetreden in de hechtingslaag en dit voor een vrij lage waarde in vergelijking met de minimum bekomen sterktes voor $W/C=0,8$ op een ruwe ondergrond.

Globaal gezien kan men, vooral gebaseerd op de afschuifsterkte, concluderen dat een ruwer oppervlak en een hogere water/cement-factor betere hechting veroorzaken.

Een verklaring hiervoor kan gevonden worden in [42] waar enkele artikels²³ gebundeld worden omtrent de herstelling van betonconstructies. Er wordt aangehaald dat hechting tussen beton en het reparatiemateriaal (hier wordt deze rol vervuld door het zand-cementmateriaal) in hoofdzaak afhankelijk is van fysische krachten en niet van de chemische binding tussen beiden. Dit verklaart eveneens dat het toepassen van een hechtingsproduct vermoedelijk hogere, maar relatief gezien dezelfde conclusies zou geven. Vooral de mechanische interlocking zal voor een goede hechting zorgen. Het zand-cement zal door goede verdichting de oppervlakteruwheden van het beton bedekken. Bovendien geldt dat hoe vloeibaarder het aangebrachte materiaal is, hoe groter het contactoppervlak tussen dit materiaal en de ondergrond en hoe beter de hechting. Tevens wordt vermeld dat voor het gebruik van een zand-cementmortel (wat wel afgeraden wordt vanwege de lage hechting) als herstellingslaag de ondergrond best bevochtigd wordt. Dit is niet gebeurd bij de proeven, maar dat verklaart weer waarom een hogere water/cement-factor betere waarden geeft omdat er sowieso meer vocht aanwezig is. Misschien dat bevochtiging met een beetje water de proefresultaten gunstiger had doen uitdraaien voor de proefstukken met $W/C=0,6$.

7.5.2 Gelijmde tegel op zand-cement of beton

Zowel bij de afschuif- als bij de hechtproef komt de geringe invloed van de water/cement-factor naar boven. Vooral de lijmsort (flex- of kleefcement) is bepalend voor de bereikte sterkte. Uit alle proeven blijkt zoals verwacht dat flexcement hogere resultaten geeft voor zowel hechting als afschuiving. Voor flexcement wordt er in deze proefopstelling niet voldaan aan de vooropgestelde prestatie-eisen en voor kleefcement (voor lagere eisen weliswaar) wél. Al moet hier rekening gehouden worden met enerzijds de jonge leeftijd van de lijm en anderzijds de proefmethodes die niet ontwikkeld zijn om de lijm maar om de verbinding te testen. Vooral de afschuifproef is representatief.

Tevens was vooral breuk vast te stellen in de lijmlaag of tussen de lijmlaag en de tegel. Het is bijgevolg moeilijk een conclusie te maken over de hechtsterkte van de lijm aan zand-cement. Wat men wel uit de afschuifproef kan vaststellen is de zwakkere afschuifsterkte voor proefstukken met beton in vergelijking met deze met zand-cement. De zand-cementlaag is veel ruwer en poreuzer, wat een betere hechting (door mechanische interlocking) toelaat dan een gladde betonlaag. Men zou verkeerdelijk kunnen concluderen dat deze stelling ontkracht wordt door de goede resultaten uit de

²³ Vooral het CUR Rapport 172 is hier gebruikt

hechtingsproeven met beton. Daar is sprake van een – achteraf cruciaal geacht – verschil in uitvoering door het wegnemen van het buigingseffect van de tegel.

7.6 Aanbevelingen

Bij enkele proeven werd reeds een evaluatie gemaakt van de proefmethode. Als men verder onderzoek plant en dergelijke proeven wilt uitvoeren kan men hier rekening mee houden. De overige proeven verlopen volgens een standaardprocedure en daar zijn bijgevolg geen wijzigingen mogelijk. Wel kan men bij het maken van de cilinders extra zorg dragen voor het goed afstrijken omdat een oneffen bovenvlak een grote spreiding in de rek veroorzaakt.

Zoals in een groot deel van de resultatenanalyse kan de invloed van de verdichting hier niet onvermeld blijven. Deze is onvermijdelijk aanwezig bij de huidige manier van verdichten. Er kan enkel getracht worden om ze zo uniform mogelijk uit te voeren. Maar met dit als enige richtlijn is er nog onvoldoende duidelijkheid. Als alle proefstukken niet door één persoon (zoals in deze thesis wél het geval was) vervaardigd worden, maar bijvoorbeeld door verschillende technische medewerkers in een labo, dan is het utopisch om ervan uit te gaan dat de verdichting gelijk is. Want *“elke laag van 5cm goed aanstampen, maar niet té hard”* kan op verschillende wijzen geïnterpreteerd worden. Dit heeft dan betrekking op de verdichtingsgraad. Hiernaast is vaak sprake geweest van de verdichtingsmethode. Daarmee wordt gewezen op de drie verschillende methodes die reeds vermeld zijn. Deze hadden duidelijk verschillende resultaten voor de druksterkte. Dit alles wijst erop dat het verdichten van een zand-cementproefstuk quasi bijna onmogelijk uniform uit te voeren is als er geen duidelijkere richtlijnen komen, zowel qua verdichtingsgraad als qua methode. Om optimaal resultaten van verschillende laboratoria te kunnen vergelijken zou er een standaardprocedure voor de verdichting moeten komen zoals dit eveneens voor beton bestaat. Zo kan er door samenwerking tussen verschillende laboratoria met een veel grotere betrouwbaarheid een heel gamma aan variërende parameters onderzocht worden. Eventueel kan men dit gamma uitbreiden door zich, voor de druksterkte althans, te focussen op de ouderdom van 28 dagen aangezien men met de verouderingscoëfficiënt van beton goede resultaten bekomt.

Zoals vermeld in het literatuuronderzoek is er voor sterkte van lijmen op jonge ouderdom amper iets te vinden in de literatuur. Daarom zou het interessant zijn om de hier uitgevoerde hechtingsproeven te onderwerpen aan een veel uitgebreider proefprogramma, waarbij men de sterkte van de lijm test op verschillende ouderdom. Ook zou men, omdat de breuk vaak optreedt in het contactoppervlak tussen lijm en tegel, de proeven kunnen uitvoeren voor verschillende soorten tegel.

Hoofdstuk 8

Samenvatting van de resultaten

In deze thesis werd onderzoek gedaan naar cementgebonden dekvloeren. De invloed van de water/cement-factor werd bestudeerd voor enkele mechanische eigenschappen. Daarnaast werden proeven uitgevoerd om het hechtingsgedrag te bekijken.

Invloed water/cement-factor

De eerste doelstelling was om de invloed van een variërende water/cement-factor na te gaan. Voor cementgebonden materialen bestudeert men meestal de eigenschappen voor een ouderdom van 28 dagen. Daarom zal hier een overzicht gegeven worden van de onderzochte sterktes.

Tabel 48: Overzicht van de sterktes op een ouderdom van 28 dagen. Alle waarden zijn in N/mm².

	$f_{ccub158}$	f_{bui600}	f_{splijt}	f_{bui160}	f_{cpr}	E_{cm}	f_{ccil}
W/C=0,7	11,92	1,61	1,19	3,03	11,34	14430,29	7,83
W/C=0,8	14,11	1,68	1,29	2,54	11,18	14868,79	9,47

Uit de analyse van de resultaten is gebleken dat de andere verdichting van de samenstelling met W/C=0,7 voor de proefstukken op ouderdom 14, 28 en 56 dagen een belangrijke invloed heeft. Deze verschillende verdichting is er enkel voor de kubussen en grote prisma's. De resultaten voor W/C=0,7 voor deze proefstukken zouden hoger zijn als ze gelijk verdicht waren als de andere samenstellingen.

Uit de proefresultaten blijkt vooral dat het verschil in mechanische eigenschappen voor de onderzochte samenstellingen met W/C=0,7 en 0,8 eerder beperkt is en dat geen eenduidige conclusies mogelijk zijn over het verschil tussen beide W/C. Algemeen kan er wél gesteld worden dat voor zulke hoge W/C nog steeds goede eigenschappen bekomen worden en dat er nog geen noemenswaardige verzwakking te bemerken is voor stijgende W/C. De gehaalde druksterktes zijn voldoende voor de eisen van de woningbouw, en liggen in de buurt van de ondergrens voor de utiliteitsbouw. De buigtreksterktes voldoen net aan de eisen die een zwevende dekvloer vraagt.

Voor beton zijn er reeds vele wetten vastgelegd. De toepasbaarheid van deze wetten op zand-cement lijkt vrij goed te zijn. De theoretische krimp komt zeer goed overeen met de experimenteel bepaalde waarden. De krimp wordt uitgedrukt in functie van de druksterkte van het materiaal. Hierdoor is er geen rechtstreekse afhankelijkheid van W/C. Daarnaast levert de formule van de ouderdomscoëfficiënt van beton eveneens een goede richtwaarde voor zand-cement. Men kan deze aldus gebruiken om via de sterkte op 28 dagen de sterktes op andere leeftijd te bepalen. Hierdoor

kunnen er veel proeven op andere leeftijden uitgespaard worden. Ook de vormfactoren komen in de buurt van de experimentele waarden voor zand-cement. De vormfactoren zijn echter aan meer spreiding onderhevig.

Hechtingsgedrag

Voor de studie van het hechtingsgedrag werden nieuwe proefmethoden bedacht in deze thesis. Het belangrijkste doel van deze proeven was om een eerste idee te krijgen.

Voor de hechting van zand-cement op beton, moet vooral onthouden worden dat zowel een hogere water/cement-factor als een ruwer oppervlak betere hechting veroorzaken. Uit de proeven met gelijkde tegels op zand-cement, kwam men te weten dat er geen afhankelijkheid is van (de water/cement-factor van) het zand-cement. De breuk trad nooit op door een gebrekkige hechting tussen zand-cement en lijm. Tabel 49 en Tabel 50 geven de gemiddelde resultaten van alle proeven.

Tabel 49: Resultaten hechtingsgedrag van zand-cement op betonnen ondergrond. Alle waarden in N/mm².

	W/C=0,6	W/C=0,8	Grote platen (W/C=0,8)
Afschuifsterkte Glad	0,0068	0,1805	0,1612
Afschuifsterkte Ruw	0,0495	0,3405	0,3432
Hechtsterkte Glad	0	0,053	-
Hechtsterkte Ruw	0,017	0,137	-

Wat in Tabel 49 opvalt, is dat in elk geval de resultaten voor W/C=0,8 een pak hoger zijn dan voor W/C=0,6. Eveneens is de hechting beter voor de ruwe ondergrond. Daarnaast is de echte hechtsterkte, waar loodrecht op het hechtingsoppervlak getrokken wordt, heel wat lager dan de afschuifsterkte, waar evenwijdig met dit oppervlak geduwd wordt.

Tabel 50: Resultaten hechtingsgedrag van een gelijkde tegel op zand-cement. Alle waarden in N/mm².

	W/C=0,6	W/C=0,8
Afschuifsterkte Kleef	0,611	0,679
Afschuifsterkte Flex	0,933	0,940
Hechtsterkte Kleef	0,695	0,620
Hechtsterkte Flex	0,799	0,680

Er is in Tabel 50 geen afhankelijkheid vast te stellen van de water/cement-factor. Enkel bij de hechtsterkte zou men dit kunnen vermoeden. Door onbelemmerde buiging van de tegel zijn deze resultaten echter minder betrouwbaar. Het belangrijkste verschil wordt bepaald door de lijmsoort. Flexcement garandeert hogere afschuif- en hechtsterkte. De waarden liggen hoger, maar bereiken niet de vermelde sterkte van 1N/mm² (tegenover 0,5N/mm² voor Kleefcement). Er dient hier wel opgemerkt dat deze cementgebaseerde lijmen getest werden op jongere ouderdom dan 28 dagen. Bovendien is de proefopstelling vooral bedoeld om het hechtingsgedrag te bekijken en minder om specifiek de lijmsterktes te controleren. Verder onderzoek kan zich toeleggen op de eigenschappen van de lijmsterkte in functie van de ouderdom.

Algemeen

De zwakkere sterkte van de proefstukken met W/C=0,7 kan verklaard worden door een mindere verdichting. Algemeen is gebleken dat de verdichting een niet te onderschatten invloed heeft op de

materiaaleigenschappen. Dit geldt zowel voor verdichtingsgraad als verdichtingsmethode. Er is aangetoond dat een verschil in verdichtingsgraad een véél groter effect heeft dan een verschil in W/C. De resultaten van de eerste samenstelling met W/C=0,7 van 15 februari en deze van de HoGent maken eveneens het belang van verdichtingsmethode duidelijk. Hier wordt vooral gedoeld op de gehanteerde verdichtingsstamper. Het is ten zeerste aan te raden om een uniforme wijze van verdichten te bedenken om zo beter vergelijkingen te kunnen maken tussen de verschillende proefresultaten.

Dat de reeds verkregen resultaten daarom zinloos zijn, is zwaar overdreven. Een perfect gelijke verdichting zal op de werf namelijk nooit het geval zijn. Deze resultaten kunnen in een grotere database opgenomen worden om zo de invloed van alle parameters na te gaan. Er dient alleen rekening gehouden te worden met de invloed van de verdichting. Uiteindelijk bekomt men een materiaalmodel dat in staat is om het juiste plaatsingstijdstip te bepalen van de vloerafwerking op een cementgebonden dekvloer.

Bijlagen

Bijlage A Technische fiche CEM II/B-M 32,5 N [34]

CEM II/B-M 32,5 N

Multi-functioneel cement



Het product en zijn toepassingen

Het cement CEM II/B-M 32,5 N is een portlandcomposiet-cement dat als hoofdbestanddelen portlandklinker (K), siliciumhoudende vlieg-as (V) en gegranuleerde hoogovenslak (S) bevat. Het klinkergehalte is begrepen tussen 65% en 79%.

Aanbevolen toepassingsgebieden

- Metsel- en legmortels, pleisters en dekvloeren (chapes)
- Beton met middelmatige druksterkte voor kleine werkzaamheden, dat traag mag verhard, in niet agressieve omgeving

Speciale aanbeveling

- De nabehandeling van het beton verzorgen om het risico op verstuiving van het betonoppervlak te vermijden
- Maatregelen nemen tegen de trage verharding

Tegenindicaties

- Beton met gewaarborgde sterkte
- Toepassing in de winterperiode
- Beton in agressief milieu (omgevingsklassen EA2 en EA3 volgens de norm NBN B15-001)
- Beton blootgesteld aan dooizouten (omgevingsklasse EE4 volgens de norm NBN B15-001)
- Voegwerk (muren en vloeren)

Fabriek Haccourt
gecertificeerd



Het cement CEM II/B-M 32,5 N is als CEM II/B-M (S-V) 32,5 N CE-ge-maarkeerd, hetgeen zijn overeenkomstig-hed garandeert met de norm EN 197-1. Bovendien beantwoordt het aan de nationale norm en draagt het cement het kwaliteitsmerk BENOR zoals hieronder aangegeven:



LAND	NORM	BENAMING	MERK
Belgie	NBN EN 197-1 PTV 603	CEM II/B-M (S-V) 32,5 N	Benor

De MSDS fiche van dit product is beschikbaar op www.holcim.be

Voordelen van CEM II/B-M 32,5 N

- Uitstekende verwerkbaarheid van verse mortel
- Goede sterkte op lange termijn

Technische specificaties

Mechanische en fysische eigenschappen *

	EENHEDEN	RESULTATEN	EISEN EN 197-1 en PTV 603
Binding			
Waterbehoefte	%	28	-
Begin	hh:mm	4:30	≥ 1:15
Einde	hh:mm	6:20	≤ 12:00
Stabiliteit	mm	≤ 1	≤ 10
Druksterkte			
2 dagen	N/mm ²	14	-
7 dagen	N/mm ²	31	16
28 dagen	N/mm ²	46	≥ 32,5 ≤ 52,5
Specifieke oppervlakte Blaine	m ² /kg	315	-
Absolute volumemassa	kg/m ³	3010	-
Schijnbare volumemassa	kg/m ³	1157	-
Zeefrest 200 µm	%	≤ 0,2	≤ 3,0

Chemische samenstelling *

	RESULTATEN (%)	EISEN (%) EN 197-1
CaO	51,4	-
SiO ₂	21,6	-
Al ₂ O ₃	9,4	-
Fe ₂ O ₃	4,8	-
MgO	1,2	-
Na ₂ O	0,87	-
K ₂ O	0,71	-
SO ₃	2,7	≤ 3,5
Cl ⁻	0,04	≤ 0,10
Gloeiverlies	2,8	-
Onoplosbare rest	12,4	-

* Opmerking: De resultaten weergegeven in de tabellen zijn gebaseerd op gemiddelde waarden en zijn louter indicatief. Zij hebben dus geen contractuele waarde. Holcim (België) n.v. kan er dus op geen enkele wijze verantwoordelijk voor worden gesteld.

Holcim (België) N.V.

Avenue Jean Monnet 12 - B-1400 Nivelles
T +32 67 87 66 01 - F +32 67 87 91 30
Technical helpdesk: tech-be@holcim.com

www.holcim.be

Bijlage B Resultaten drukproef bij variërende W/C

[illegible]

W/C	Proefstuk	Lengte (mm)	Breedte (mm)	Hoogte (mm)	Breuklast (kN)	Druksterkte (N/mm ²)	Massa (kg)	Volumemassa (kg/m ³)	Ouderdom (dagen)
0,7	W/C0,7-29-1	157,73	159,43	158,28	274,5	10,92	7,699	1934	29
		157,35	159,2	158,21					
		157,82	159,38	158,29					
		158,01	159,71	158,33					
	W/C0,7-29-2	157,13	159,04	158,20	290,3	11,62	7,697	1947	29
		157,33	159,06	158,17					
		157,17	159,01	158,23					
		156,89	159,06	158,19					
	W/C0,7-29-3	158,80	158,28	159,30	309,1	12,30	7,864	1964	29
		158,68	158,31	159,06					
		158,96	158,27	159,46					
		158,77	158,26	159,37					
	W/C0,7-29-4	158,36	158,81	158,20	290,8	11,56	7,72	1941	29
		158,09	159,24	158,12					
		158,24	158,73	158,34					
		158,74	158,45	158,13					
0,80	W/C0,8-29-1	157,75	158,34	158,90	275,2	11,02	7,869	1983	29
		158,14	158,22	158,82					
		157,34	158,39	158,88					
		157,77	158,41	158,99					
	W/C0,8-29-2	158,17	158,31	159,00	280,1	11,19	7,881	1980	29
		159,04	158,29	158,93					
		157,71	158,3	158,99					
		157,77	158,33	159,07					
	W/C0,8-29-3	158,21	158,49	158,07	317,5	12,66	8,009	2021	29
		158,86	158,28	158,01					
		157,88	158,56	158,09					
		157,9	158,64	158,1					
	W/C0,8-29-4	158,38	158,21	158,20	318,5	12,71	7,996	2017	29
		158,84	158,22	158,19					
		158,2	158,21	158,21					
		158,09	158,19	158,2					

Bijlage C Resultaten drukproef

Proefstuk	Lengte (mm)	Breedte (mm)	Hoogte (mm)	Breuklast (kN)	Druksterkte (N/mm ²)	Massa (kg)	Volumemassa (kg/m ³)	Ouderdom (dagen)
W/C0,7-1-1	157,44	159,71	158,25	38,34	1,52	8,068	2028	1
	156,63	160,03	158,11					
	157,64	159,66	158,37					
	158,04	159,44	158,28					
W/C0,7-1-2	158,30	160,56	158,38	40,73	1,60	8,251	2050	1
	158,23	160,3	158,54					
	158,3	160,95	158,06					
	158,36	160,44	158,53					
W/C0,7-1-3	159,78	158,19	159,41	42,77	1,69	8,231	2043	1
	159,2	158,14	159,66					
	160,02	158,14	159,44					
	160,12	158,28	159,13					
W/C0,7-2-1	158,04	158,17	158,66	118,17	4,73	8,058	2032	2
	157,91	157,1	158,36					
	158,22	158,17	158,91					
	157,98	159,25	158,7					
W/C0,7-2-2	158,99	158,42	158,23	130,74	5,19	8,176	2051	2
	159,6	158,38	158,23					
	159,1	158,45	158,2					
	158,27	158,44	158,26					
W/C0,7-2-3	158,34	159,59	159,01	130,75	5,17	8,215	2044	2
	158,37	159,07	158,9					
	158,39	160,15	158,89					
	158,26	159,55	159,24					
W/C0,7-3-1	159,63	158,89	158,14	175,35	6,91	8,0197	1999	3
	159,07	159,26	158,1					
	159,9	158,45	158,17					
	159,93	158,97	158,14					
W/C0,7-3-2	159,54	158,14	159,35	188,48	7,47	8,2265	2046	3
	159,78	158,06	159,52					
	159,52	158,2	159,34					
	159,31	158,15	159,2					
W/C0,7-3-3	159,62	159,55	158,34	169,93	6,67	7,9997	1984	3
	159,79	159,19	158,28					
	159,51	159,7	158,38					
	159,56	159,76	158,35					

[illegible]

Proefstuk	Lengte (mm)	Breedte (mm)	Hoogte (mm)	Breuklast (kN)	Druksterkte (N/mm ²)	Massa (kg)	Volumemassa (kg/m ³)	Ouderdom (dagen)
W/C0,7-28-4	157,94	159,44	159,16	325	12,91	8,088	2018	28
	157,85	159,15	159,12					
	158,08	159,58	159,2					
	157,89	159,59	159,17					
W/C0,7-56-1	159,08	159,21	158,38	363,53	14,35	7,8743	1963	56
	158,68	159,06	158,34					
	159,17	159,26	158,45					
	159,4	159,3	158,34					
W/C0,7-56-2	157,96	157,87	159,56	371,66	14,90	7,7775	1955	56
	157,99	158,53	159,83					
	158,11	157,92	159,62					
	157,79	157,17	159,23					
W/C0,7-56-3	159,10	158,23	159,64	377,03	14,98	7,8736	1959	56
	159,44	158,14	159,76					
	159,43	158,24	159,68					
	158,43	158,3	159,47					
	159,08	159,21	158,38	363,53	14,35	7,8743	1963	56

Proefstuk	Lengte (mm)	Breedte (mm)	Hoogte (mm)	Breuklast (kN)	Druksterkte (N/mm ²)	Massa (kg)	Volumemassa (kg/m ³)	Ouderdom (dagen)
W/C0,8-1-1	158,11	158,26	160,06	59,73	2,39	8,438	2107	1
	158,09	158,38	160,66					
	158,25	157,94	160,18					
	158	158,45	159,33					
W/C0,8-1-2	158,14	158,24	159,61	65,36	2,61	8,435	2112	1
	158,24	158,36	159,32					
	158,04	157,83	160,02					
	158,15	158,52	159,5					
W/C0,8-1-3	158,17	159,70	158,81	61,86	2,45	8,373	2087	1
	158,15	160,03	158,37					
	158,23	159,95	158,87					
	158,14	159,12	159,18					
W/C0,8-2-1	159,28	159,62	158,07	116,86	4,60	8,3144	2069	2
	159,13	159,89	158,06					
	159,35	159,58	158,23					
	159,37	159,39	157,92					
W/C0,8-2-2	159,30	159,69	158,35	114,5	4,50	8,3139	2064	2
	159,61	159,75	158,35					
	158,66	159,76	158,4					
	159,62	159,57	158,29					

Proefstuk	Lengte (mm)	Breedte (mm)	Hoogte (mm)	Breuklast (kN)	Druksterkte (N/mm ²)	Massa (kg)	Volumemassa (kg/m ³)	Ouderdom (dagen)
W/C0,8-2-3	159,70	157,74	158,13	110,55	4,39	8,2155	2062	2
	159,64	157,8	158,13					
	159,6	157,75	158,24					
	159,87	157,67	158,02					
W/C0,8-3-1	159,02	159,62	158,60	142,6	5,62	8,2944	2060	3
	159,65	159,89	158,6					
	158,89	159,67	158,45					
	158,53	159,29	158,76					
W/C0,8-3-2	159,28	159,85	158,47	145,11	5,70	8,3429	2068	3
	158,82	160,78	158,42					
	159,43	159,83	158,4					
	159,6	158,93	158,6					
W/C0,8-3-3	159,61	159,64	158,32	152,27	5,98	8,3432	2068	3
	159,76	159,3	158,3					
	159,66	159,98	158,27					
	159,41	159,64	158,4					
W/C0,8-7-1	160,57	159,27	158,39	267,41	10,46	8,3795	2069	7
	160,61	158,81	158,31					
	160,38	159,33	158,34					
	160,72	159,66	158,51					
W/C0,8-7-2	158,75	158,50	159,75	228,02	9,06	8,1166	2019	7
	158,96	158,74	160,26					
	158,69	158,37	159,7					
	158,6	158,4	159,28					
W/C0,8-7-3	159,47	160,85	158,48	246,32	9,60	8,1699	2010	7
	159,61	160,75	158,35					
	159,63	161,04	158,58					
	159,17	160,77	158,52					
W/C0,8-14-1	158,06	159,52	159,20	299,85	11,89	8,1893	2040	14
	158,08	159,6	159,3					
	158,03	159,81	159,32					
	158,06	159,15	158,97					
W/C0,8-14-2	158,41	158,39	159,69	314,22	12,52	8,2227	2052	14
	158,64	158,36	160,03					
	158,14	158,46	159,62					
	158,44	158,35	159,43					

Proefstuk	Lengte (mm)	Breedte (mm)	Hoogte (mm)	Breuklast (kN)	Druksterkte (N/mm ²)	Massa (kg)	Volumemassa (kg/m ³)	Ouderdom (dagen)
W/C0,8-14-3	158,12	158,20	159,02	278,46	11,13	8,1268	2043	14
	158,08	158,22	158,81					
	158,05	158,26	158,98					
	158,24	158,13	159,26					
W/C0,8-28-1	158,16	156,52	159,15	359,81	14,54	8,1212	2061	28
	158,12	157,04	159,04					
	158,14	156,05	159,17					
	158,21	156,46	159,23					
W/C0,8-28-2	158,80	158,03	158,67	344,28	13,72	8,132	2042	28
	158,71	158,24	158,77					
	158,9	158,26	158,97					
	158,8	157,6	158,27					
W/C0,8-28-3	158,29	158,91	159,33	354,27	14,08	8,1903	2044	28
	158,31	158,73	158,97					
	158,29	159,49	159,39					
	158,27	158,5	159,63					
W/C0,8-56-1	159,70	156,65	157,90	429,11	17,15	8,0225	2031	56
	159,4	157,06	157,1					
	159,63	156,64	158,4					
	160,08	156,26	158,21					
W/C0,8-56-2	158,27	158,41	159,02	432,37	17,25	8,0661	2023	56
	158,54	158,35	158,76					
	157,87	158,45	159,05					
	158,4	158,44	159,25					
W/C0,8-56-3	158,38	158,80	158,73	378,55	15,05	7,9416	1989	56
	158,31	158,41	158,59					
	158,44	158,72	158,66					
	158,39	159,27	158,94					

Bijlage D Resultaten buig- en slijtproef

Buigproef

Proefstuk	Afmetingen breukvlak		Breuklast (kN)	Buigtreksterkte (N/mm ²)	Ouderdom (dagen)
	Lengte (mm)	Hoogte (mm)			
W/C0,7-1-1	150,55	150,7	3,2	0,70	1
W/C0,7-1-2	150,52	151,92	3,05	0,66	1
W/C0,7-1-3	150,72	149,97	3,05	0,67	1
W/C0,7-2-1	149,47	150,4	6,4	1,42	2
W/C0,7-2-2	152,91	150,72	6,65	1,44	2
W/C0,7-2-3	150,42	149,98	6,7	1,49	2
W/C0,7-3-1	152,69	150,32	7,65	1,66	3
W/C0,7-3-2	151,29	151,21	8,05	1,75	3
W/C0,7-3-3	148,29	150,34	7,6	1,70	3
W/C0,7-7-1	152,98	150,88	7,45	1,60	7
W/C0,7-7-2	153,01	151,33	7,05	1,51	7
W/C0,7-7-3	152,31	151,14	7,35	1,58	7
W/C0,7-14-1	150,36	150,02	7,05	1,56	14
W/C0,7-14-2	150,44	151,69	6,6	1,43	14
W/C0,7-14-3	152,96	152,34	6,5	1,37	14
W/C0,7-28-1	151,75	149,97	6,8	1,49	28
W/C0,7-28-2	150,65	151,67	7,85	1,70	28
W/C0,7-28-3	151,8	150,88	6,95	1,51	28
W/C0,7-28-4	152,36	150,72	8,1	1,76	28
W/C0,7-56-1	150,61	152,04	10,05	2,16	56
W/C0,7-56-2	152,53	150,95	9,45	2,04	56
W/C0,7-56-3	151,26	151,63	9,5	2,05	56
W/C0,8-1-1	152,91	151,97	1,15	0,24	1
W/C0,8-1-2	152,2	151,22	1,15	0,25	1
W/C0,8-1-3	151,07	150,82	1,1	0,24	1

Proefstuk	Afmetingen breukvlak		Breuklast	Buigtreksterkte	Ouderdom
	Lengte (mm)	Hoogte (mm)			
W/C0,8-2-1	152,71	151,04	4,95	1,07	2
W/C0,8-2-2	151,78	150,48	4,9	1,07	2
W/C0,8-2-3	150,86	152,25	5,15	1,10	2
W/C0,8-3-1	152,36	150,34	6,4	1,39	3
W/C0,8-3-2	151,69	150,74	6,5	1,41	3
W/C0,8-3-3	152,65	150,49	6,4	1,39	3
W/C0,8-7-1	150,23	151,62	9,1	1,98	7
W/C0,8-7-2	151,48	150,03	8,95	1,97	7
W/C0,8-7-3	152,08	151,2	8,95	1,93	7
W/C0,8-14-1	151,53	152,33	7,5	1,60	14
W/C0,8-14-2	151,43	151,47	6,95	1,50	14
W/C0,8-14-3	150,68	151,07	8,9	1,94	14
W/C0,8-28-1	151,2	151,33	6,7	1,45	28
W/C0,8-28-2	151,17	149,83	7,4	1,64	28
W/C0,8-28-3	150,95	151,94	8,05	1,73	28
W/C0,8-56-1	151,67	151,01	8,95	1,94	56
W/C0,8-56-2	151,77	150,26	10,25	2,24	56
W/C0,8-56-3	150,9	150,15	11	2,43	56

Splijtproef

Proefstuk	Afmetingen breukvlak		Breuklast	Splijttreksterkte	Ouderdom
	Lengte	Hoogte			
	(mm)	(mm)	(kN)	(N/mm ²)	(dagen)
W/C0,7-1-1-helft1	152,5	150,34	6	0,17	1
W/C0,7-1-1-helft2	149,31	150,41	11	0,31	1
W/C0,7-1-2-helft1	152,11	152,06	13	0,36	1
W/C0,7-1-2-helft2	151,09	152,01	12	0,33	1
W/C0,7-1-3-helft1	149,16	150,35	15	0,43	1
W/C0,7-1-3-helft2	151,23	149,47	13	0,37	1
W/C0,7-2-1-helft1	148,14	150,16	24	0,69	2
W/C0,7-2-1-helft2	150,1	150,53	19	0,54	2
W/C0,7-2-2-helft1	152,98	150,64	31	0,86	2
W/C0,7-2-2-helft2	151,39	151,31	28	0,78	2
W/C0,7-2-3-helft1	149,01	150,18	26	0,74	2
W/C0,7-2-3-helft2	150,54	150,43	26	0,73	2
W/C0,7-3-1-helft1	153,19	150,53	29,2	0,81	3
W/C0,7-3-1-helft2	150,83	150,01	30,4	0,86	3
W/C0,7-3-2-helft1	151,27	151,07	29,6	0,82	3
W/C0,7-3-2-helft2	151,15	150,48	26,8	0,75	3
W/C0,7-3-3-helft1	148,96	150,35	27,2	0,77	3
W/C0,7-3-3-helft2	152,16	149,28	32,4	0,91	3
W/C0,7-7-1-helft1	152,77	150,72	44	1,22	7
W/C0,7-7-1-helft2	151,54	151,72	39	1,08	7
W/C0,7-7-2-helft1	151,54	151,72	37	1,02	7
W/C0,7-7-2-helft2	152,39	151,34	36	0,99	7
W/C0,7-7-3-helft1	152,64	151,42	40	1,10	7
W/C0,7-7-3-helft2	150,45	151,68	36	1,00	7
W/C0,7-14-1-helft1	151,74	150,34	32	0,89	14
W/C0,7-14-1-helft2	149,41	149,87	34	0,97	14
W/C0,7-14-2-helft1	150,51	151,22	35	0,98	14

Proefstuk	Afmetingen breukvlak		Breuklast (kN)	Splijttreksterkte (N/mm ²)	Ouderdom (dagen)
	Lengte (mm)	Hoogte (mm)			
W/C0,7-14-2-helft2	149,95	149,97	35	0,99	14
W/C0,7-14-3-helft1	152,48	152,11	31	0,85	14
W/C0,7-14-3-helft2	152,41	152,27	37	1,01	14
W/C0,7-28-1-helft1	151,93	150,41	38	1,06	28
W/C0,7-28-1-helft2	150,86	150,41	48	1,35	28
W/C0,7-28-2-helft1	151,83	151,86	47	1,30	28
W/C0,7-28-2-helft2	148,99	151,41	36	1,02	28
W/C0,7-28-3-helft1	151,16	151,36	40	1,11	28
W/C0,7-28-3-helft2	149,85	150,53	33,5	0,95	28
W/C0,7-28-4-helft1	152,35	150,7	52	1,44	28
W/C0,7-28-4-helft2	151,17	150,71	47	1,31	28
W/C0,7-56-1-helft1	151,05	150,95	47,5	1,33	56
W/C0,7-56-1-helft2	150,84	152,07	49	1,36	56
W/C0,7-56-2-helft1	152,15	151,4	38,5	1,06	56
W/C0,7-56-2-helft2	150,85	150,07	43	1,21	56
W/C0,7-56-3-helft1	149,97	150,38	51,5	1,45	56
W/C0,7-56-3-helft2	151,05	151,24	37,5	1,05	56

Proefstuk	Afmetingen breukvlak		Breuklast (kN)	Splijttreksterkte (N/mm ²)	Ouderdom (dagen)
	Lengte (mm)	Hoogte (mm)			
W/C0,8-1-1-helft1	153,5	152,73	7	0,19	1
W/C0,8-1-1-helft2	151,82	152,51	6	0,16	1
W/C0,8-1-2-helft1	150,95	150,97	7	0,20	1
W/C0,8-1-2-helft2	154,62	150,48	7	0,19	1
W/C0,8-1-3-helft1	151,19	150,48	8	0,22	1
W/C0,8-1-3-helft2	151,18	151,02	8	0,22	1
W/C0,8-2-1-helft1	152,41	151,24	19	0,52	2
W/C0,8-2-1-helft2	153,63	150,36	18	0,50	2
W/C0,8-2-2-helft1	151,25	150,58	20	0,56	2

Proefstuk	Afmetingen breukvlak		Breuklast	Splijttreksterkte	Ouderdom
	Lengte	Hoogte			
	(mm)	(mm)	(kN)	(N/mm ²)	(dagen)
W/C0,8-2-2-helft2	150,02	150,26	21	0,59	2
W/C0,8-2-3-helft1	151,3	152,66	19	0,52	2
W/C0,8-2-3-helft2	150,83	150,58	19	0,53	2
W/C0,8-3-1-helft1	152,31	150,33	24	0,67	3
W/C0,8-3-1-helft2	151,63	150,06	24	0,67	3
W/C0,8-3-2-helft1	152,43	150,5	27	0,75	3
W/C0,8-3-2-helft2	150,82	151,01	26	0,73	3
W/C0,8-3-3-helft1	152,67	150,28	26,5	0,74	3
W/C0,8-3-3-helft2	152,08	150,23	27	0,75	3
W/C0,8-7-1-helft1	151,82	150,73	39,5	1,10	7
W/C0,8-7-1-helft2	150,38	151,1	41	1,15	7
W/C0,8-7-2-helft1	151,09	150,29	34	0,95	7
W/C0,8-7-2-helft2	150,35	150,38	33	0,93	7
W/C0,8-7-3-helft1	150,77	150,78	40	1,12	7
W/C0,8-7-3-helft2	153,25	150,15	40	1,11	7
W/C0,8-14-1-helft1	151,62	152,05	39	1,08	14
W/C0,8-14-1-helft2	151,03	152,3	38	1,05	14
W/C0,8-14-2-helft1	150,09	151,49	37	1,04	14
W/C0,8-14-2-helft2	151,99	150,72	41	1,14	14
W/C0,8-14-3-helft1	150,94	150,64	42	1,18	14
W/C0,8-14-3-helft2	151,23	151,3	39	1,09	14
W/C0,8-28-1-helft1	151,57	151,06	42,5	1,18	28
W/C0,8-28-1-helft2	151,28	150,7	49,5	1,38	28
W/C0,8-28-2-helft1	151,91	150,39	46	1,28	28
W/C0,8-28-2-helft2	151,16	150,57	39,5	1,10	28
W/C0,8-28-3-helft1	151,27	151,6	48,5	1,35	28
W/C0,8-28-3-helft2	150,79	152,26	51	1,41	28
W/C0,8-56-1-helft1	151,19	150,75	59,5	1,66	56
W/C0,8-56-1-helft2	152,15	150,43	60,5	1,68	56

Proefstuk	Afmetingen breukvlak		Breuklast	Splijttreksterkte	Ouderdom
	Lengte	Hoogte			
	(mm)	(mm)	(kN)	(N/mm ²)	(dagen)
W/C0,8-56-2-helft1	150,84	150,14	46	1,29	56
W/C0,8-56-2-helft2	151,83	150,27	55	1,53	56
W/C0,8-56-3-helft1	151,01	149,86	52,5	1,48	56
W/C0,8-56-3-helft2	150,33	150,43	45,5	1,28	56

Bijlage E Resultaten buig- en drukproef

Proefstuk	Afmetingen proefstuk			Breuk- last	Buig- trek- sterkte	Massa	Volume- massa	Helft	Breuk- last	Druk- sterkte	Oude rdom
	Lengte (mm)	Breedte (mm)	Hoogte (mm)	(kN)	(N/mm ²)	(g)	(kg/m ³)		(kN)	(N/mm ²)	(dag)
W/C0,7-1-1	160,48	40,76	40,14	0,23	0,53	526,85	2007	helft1	2,43	1,52	1
								helft2	2,43	1,52	1
W/C0,7-1-2	160,45	40,1	39,99	0,23	0,54	533,36	2073	helft1	3,15	1,97	1
								helft2	3,08	1,93	1
W/C0,7-1-3	160,55	40,05	40,04	0,25	0,58	529,58	2057	helft1	3,22	2,01	1
								helft2	3,02	1,89	1
W/C0,7-2-1	160,49	40,8	40,07	0,7	1,60	517,81	1974	helft1	9,59	5,99	2
								helft2	9,18	5,74	2
W/C0,7-2-2	160,85	40,55	40,02	0,62	1,43	524,34	2009	helft1	9,66	6,04	2
								helft2	9,38	5,86	2
W/C0,7-2-3	160,7	40,7	40,03	0,74	1,70	527,62	2015	helft1	9,95	6,22	2
								helft2	9,6	6,00	2
W/C0,7-3-1	160,61	40,25	40,31	0,78	1,79	510,26	1958	helft1	11,12	6,95	3
								helft2	11,96	7,48	3
W/C0,7-3-2	160,69	40,06	40,42	0,79	1,81	518,95	1994	helft1	11,27	7,04	3
								helft2	11,43	7,14	3
W/C0,7-3-3	160,29	40,4	40,14	0,8	1,84	512,98	1973	helft1	11,71	7,32	3
								helft2	11,06	6,91	3
W/C0,7-7-1	160,43	40,24	40,07	1,03	2,39	507,05	1960	helft1	16,73	10,46	7
								helft2	16,92	10,58	7
W/C0,7-7-2	160,32	40,21	40,04	1,12	2,61	524,6	2032	helft1	20,89	13,06	7
								helft2	20	12,50	7
W/C0,7-7-3	160,14	40,61	40,05	1,1	2,53	524,18	2013	helft1	20,85	13,03	7
								helft2	19,2	12,00	7
W/C0,7-14-1	160,15	41,24	39,97	1,16	2,64	509,32	1929	helft1	15,83	9,89	14
								helft2	16,84	10,53	14
W/C0,7-14-2	160,36	41,17	39,99	1,21	2,76	507,12	1921	helft1	18,79	11,74	14
								helft2	16,97	10,61	14
W/C0,7-14-3	160,62	40,35	39,98	1,33	3,09	503,59	1944	helft1	16,54	10,34	14
								helft2	17,82	11,14	14
W/C0,7-28-1	160,64	40,89	40,28	1,37	3,10	509,5	1926	helft1	20	12,50	28
								helft2	17,56	10,98	28
W/C0,7-28-2	160,72	40,9	40,14	1,18	2,69	497,8	1887	helft1	16,69	10,43	28
								helft2	18,93	11,83	28
W/C0,7-28-3	160,61	40,31	40,21	1,44	3,31	498	1913	helft1	18,22	11,39	28
								helft2	17,51	10,94	28
W/C0,7-56-1	160,51	41,2	39,96	1,05	2,39	501,7	1899	helft1	19,91	12,44	56
								helft2	18,52	11,58	56
W/C0,7-56-2	160,12	41,14	39,98	1,11	2,53	498,6	1893	helft1	21,7	13,56	56
								helft2	22,65	14,16	56
W/C0,7-56-3	160,29	41,1	39,96	1,29	2,95	516,12	1961	helft1	23,43	14,64	56
								helft2	25,71	16,07	56

Proefstuk	Afmetingen proefstuk			Breuk- last	Buig- trek- sterkte	Massa	Volume- massa	Helft	Breuk- last	Druk- sterkte	Oude rdom
	Lengte (mm)	Breedte (mm)	Hoogte (mm)	(kN)	(N/mm ²)	(g)	(kg/m ³)		(kN)	(N/mm ²)	(dag)
W/C0,8-1-1	160,37	41,45	40,17	0,27	0,61	547,79	2051	helft1	3,26	160,37	41,45
								helft2	3,49		
W/C0,8-1-2	160,6	42,75	40,05	0,29	0,63	559,66	2035	helft1	2,82	160,6	42,75
								helft2	3,1		
W/C0,8-1-3	160,71	41,03	40,26	0,29	0,65	544,93	2053	helft1	3,56	160,71	41,03
								helft2	2,97		
W/C0,8-2-1	160,43	42,32	40,01	0,67	1,48	522,08	1922	helft1	7,81	160,43	42,32
								helft2	8,15		
W/C0,8-2-2	160,15	42,23	40,03	0,72	1,60	532,43	1967	helft1	8,25	160,15	42,23
								helft2	8,07		
W/C0,8-2-3	160,26	41,42	40,05	0,62	1,40	517,25	1946	helft1	7,95	160,26	41,42
								helft2	8,42		
W/C0,8-3-1	160,26	41,09	40,1	0,74	1,68	534,51	2024	helft1	11,21	160,26	41,09
								helft2	11,09		
W/C0,8-3-2	160,25	41,12	40,04	0,79	1,80	541,26	2051	helft1	10,69	160,25	41,12
								helft2	10,65		
W/C0,8-3-3	160,07	40,85	40,08	0,71	1,62	529,55	2021	helft1	11,18	160,07	40,85
								helft2	11,12		
W/C0,8-7-1	160,25	40,88	40,19	0,97	2,20	525,15	1995	helft1	18,03	160,25	40,88
								helft2	18,18		
W/C0,8-7-2	160,53	40,9	40,12	1,08	2,46	527,94	2004	helft1	18,7	160,53	40,9
								helft2	17,82		
W/C0,8-7-3	160,52	40,96	40,26	0,99	2,24	526,68	1990	helft1	16,71	160,52	40,96
								helft2	16,13		
W/C0,8-14-1	160,16	40,41	40,19	1,11	2,55	509,45	1959	helft1	17,53	160,16	40,41
								helft2	18,46		
W/C0,8-14-2	160,54	40,28	40,3	1,03	2,36	512,11	1965	helft1	18,43	160,54	40,28
								helft2	19,39		
W/C0,8-14-3	160,62	40,79	40,35	1,17	2,64	517,98	1959	helft1	15,58	160,62	40,79
								helft2	17,65		
W/C0,8-28-1	160,93	40,61	39,96	1,04	2,41	513	1964	helft1	15,22	160,93	40,61
								helft2	19,45		
W/C0,8-28-2	160,81	40,48	40,02	1,13	2,61	512,33	1967	helft1	20,16	160,81	40,48
								helft2	18,71		
W/C0,8-28-3	160,62	40,33	39,95	1,11	2,59	510,24	1972	helft1	16,35	160,62	40,33
								helft2	17,44		
W/C0,8-56-1	160,12	40,49	39,99	1,36	3,15	503,51	1942	helft1	22,63	160,12	40,49
								helft2	18,83		
W/C0,8-56-2	160,62	39,88	40,19	1,23	2,86	502,17	1951	helft1	21,32	160,62	39,88
								helft2	17,59		
W/C0,8-56-3	160,29	40,28	40,12	1,28	2,96	511,65	1975	helft1	15,39	160,29	40,28
								helft2	21,69		

Bijlage F Resultaten stijfheidsontwikkeling

Omdat het weergeven van alle metingen onbegonnen werk is vanwege de telkens enorm grote Excelbestanden en omdat de aflezing van de resultaten ook volgens een standaardprocedure verloopt, worden hier enkel de resulterende E-moduli gegeven tezamen met de druksterktes.

W/C 0,7			W/C 0,8		
Proefstuk	E-modulus [N/mm ²]	Druksterkte[kN]	Proefstuk	E-modulus [N/mm ²]	Druksterkte[kN]
W/C0,7-1-1	7771,97	43,43	W/C0,8-1-1	10001,54	40,94
	7183,46			7940,56	
	8025,31			13585,2	
	8107,13			8478,87	
W/C0,7-1-2	8677,50	42,29	W/C0,8-1-2	8591,56	39,39
	9896,18			7774,04	
	8385,41			10670,9	
	7750,91			7329,73	
W/C0,7-1-3	8728,60	49,35	W/C0,8-1-3	7942,54	36,46
	9638,56			6800,54	
	9281,7			7591,04	
	7265,53			9436,05	
W/C0,7-2-1	8827,27	74,56	W/C0,8-2-1	10094,06	71,67
	8819,12			10604,4	
	8937			11886,9	
	8725,68			7790,87	
W/C0,7-2-2	9862,09	71,68	W/C0,8-2-2	9727,52	54,84
	10896,63			9637,08	
	9916,05			8912,58	
	8773,59			10632,9	
W/C0,7-2-3	9829,63	66,03	W/C0,8-2-3	9385,17	67,99
	10640,43			8884,25	
	8627,85			9757,94	
	10220,6			9513,32	
W/C0,7-3-1	10366,70	92,08	W/C0,8-3-1	11815,80	94,73
	10358,38			11739,8	
	9282,42			10485,4	
	11459,3			13222,2	
W/C0,7-3-2	10584,04	82,83	W/C0,8-3-2	11238,43	89,9
	10391,19			11444,1	
	12110,25			11116,3	
	9250,67			11154,9	
W/C0,7-3-3	11422,47	99,21	W/C0,8-3-3	10137,44	87,11
	11362,05			10861,8	
	10500,77			10552,8	
	12404,6			8997,72	
W/C0,7-7-1	14004,26	135,19	W/C0,8-7-1	14646,17	140,67
	16064,79			14794,6	
	12010,4			13274,6	
	13937,6			15869,3	

W/C 0,7			W/C 0,8		
Proefstuk	E-modulus [N/mm ²]	Druksterkte[kN]	Proefstuk	E-modulus [N/mm ²]	Druksterkte[kN]
W/C0,7-7-2	13719,71	136,79	W/C0,8-7-2	14991,73	140,21
	15571,56			10444,2	
	14655,56			13446,5	
	10932			21084,5	
W/C0,7-7-3	14569,15	129,42	W/C0,8-7-3	14404,77	138,8
	14985,93			15154	
	14950,93			14420,2	
	13770,6			13640,1	
W/C0,7-14-1	14370,47	137,96	W/C0,8-14-1	12865,43	141,8
	10724,12			11164,3	
	17695,48			14271,9	
	14691,8			13160,1	
W/C0,7-14-2	12423,21	153,59	W/C0,8-14-2	13628,90	147,28
	9892,1			15952,6	
	15380,94			11977,2	
	11996,6			12956,9	
W/C0,7-14-3	14869,83	142,96	W/C0,8-14-3	13198,93	162,34
	17706,78			13255	
	13631,9			13494,4	
	13270,8			12847,4	
W/C0,7-28-1	13377,78	137	W/C0,8-28-1	14348,47	154,51
	11418,32			9551,92	
	16454,73			14732,3	
	12260,3			18761,2	
W/C0,7-28-2	14085,12	127,03	W/C0,8-28-2	13524,33	171,58
	14813,3			11884	
	13254,27			14439	
	14187,8			14250	
W/C0,7-28-3	15827,98	151,31	W/C0,8-28-3	16733,57	175,84
	16561,89			23341,6	
	15167,64			12303,2	
	15754,4			14555,9	
W/C0,7-56-1	16273,03	186,74	W/C0,8-56-1	18228,73	195,67
	14761,5			24614,3	
	13170,6			15901,5	
	20887			14170,4	
W/C0,7-56-2	15527,60	171,99	W/C0,8-56-2	15068,57	190,45
	11702,5			13507	
	17013,4			15695	
	17866,9			16003,7	
W/C0,7-56-3	14576,30	138,17	W/C0,8-56-3	15482,07	194,63
	14765,6			14077,2	
	13303,7			17522,4	
	15659,6			14846,6	

Bijlage G Krimpmetingen

W/C0,7A	60%RV		20°C		
Ouderdom [dagen]	zijde 1	zijde 2	zijde 3	zijde 4	gem. krimp
1	8655	8560	9010	8670	0
2	8595	8480	8980	8570	0,0000675
5	8580	8470	8910	8540	0,00009875
6	8575	8465	8875	8570	0,0001025
7	8570	8460	8890	8575	0,0001
8	8570	8445	8885	8565	0,0001075
9	8567	8440	8885	8565	0,0001095
12	8555	8430	8875	8552	0,00012075
13	8535	8425	8845	8535	0,00013875
14	8515	8395	8830	8525	0,0001575
15	8502	8370	8790	8495	0,0001845
16	8475	8355	8785	8470	0,0002025
19	8425	8290	8760	8410	0,0002525
20	8405	8255	8715	8335	0,00029625
21	8365	8250	8695	8365	0,000305
22	8365	8235	8595	8365	0,00033375
23	8355	8220	8675	8365	0,00032
26	8350	8205	8665	8350	0,00033125
27	8340	8200	8655	8345	0,00033875
28	8320	8185	8650	8335	0,00035125
29	8285	8175	8615	8295	0,00038125
30	8275	8185	8620	8305	0,0003775
33	8240	8145	8605	8280	0,00040625
34	8230	8145	8600	8275	0,00041125
35	8225	8140	8600	8260	0,0004175
36	8215	8130	8600	8240	0,0004275
40	8195	8095	8570	8225	0,0004525
41	8170	8090	8555	8210	0,0004675
44	8165	8065	8555	8185	0,00048125
48	8155	8055	8545	8175	0,00049125
50	8150	8055	8530	8175	0,00049625
55	8140	8040	8520	8150	0,00051125
57	8130	8040	8510	8140	0,00051875
61	8115	8040	8505	8135	0,000525
64	8105	8040	8505	8120	0,00053125
69	8100	8035	8500	8115	0,00053625
72	8090	8035	8500	8115	0,00053875
79	8080	8020	8490	8110	0,00054875
W/C0,7B	60%RV		20°C		
Ouderdom [dagen]	zijde 1	zijde 2	zijde 3	zijde 4	gem. krimp
1	8285	7620	8180	8570	0
2	8230	7575	8160	8480	5,25E-05
5	8200	7470	8060	8460	0,000116
6	8180	7460	8055	8440	0,00013
7	8160	7455	8045	8400	0,000149
8	8150	7450	8045	8390	0,000155
9	8142	7445	8042	8385	0,00016
12	8120	7435	8035	8370	0,000174
13	8110	7430	8025	8365	0,000181
14	8065	7370	8010	8370	0,00021
15	8040	7330	7995	8350	0,000235
16	8015	7300	7980	8335	0,000256
19	7960	7260	7915	8260	0,000315
20	7955	7155	7890	8235	0,000355
21	7940	7205	7855	8160	0,000374

22	7930	7125	7795	8195	0,000403
23	7865	7185	7845	8200	0,00039
26	7850	7155	7780	8160	0,000428
27	7855	7150	7775	8130	0,000436
28	7850	7130	7760	8110	0,000451
29	7870	7165	7780	8125	0,000429
30	7845	7165	7785	8110	0,000438
33	7830	7160	7740	8095	0,000458
34	7840	7145	7755	8080	0,000459
35	7830	7135	7750	8060	0,00047
36	7820	7120	7745	8045	0,000481
40	7810	7105	7725	8020	0,000499
41	7795	7100	7710	8000	0,000513
44	7785	7090	7685	7995	0,000525
48	7780	7090	7660	7970	0,000539
50	7775	7085	7645	7965	0,000546
55	7770	7055	7630	7955	0,000561
57	7775	7055	7625	7950	0,000563
61	7765	7045	7620	7940	0,000571
64	7760	7020	7610	7935	0,000583
69	7730	7020	7605	7920	0,000595
72	7725	7020	7610	7915	0,000596
79	7720	7015	7605	7905	0,000603
W/C0,7C		60%RV	20°C		
Ouderdom [dagen]	zijde 1	zijde 2	zijde 3	zijde 4	gem. krimp
1	8610	8575	9640	8395	0
2	8575	8520	9620	8290	0,00005375
5	8510	8475	9580	8250	0,00010125
6	8490	8450	9560	8160	0,00014
7	8470	8425	9530	8215	0,000145
8	8470	8415	9515	8200	0,000155
9	8465	8412	9505	8190	0,000162
12	8435	8395	9455	8170	0,00019125
13	8415	8380	9435	8145	0,00021125
14	8395	8350	9410	8095	0,0002425
15	8370	8310	9400	8090	0,0002625
16	8365	8300	9380	8000	0,00029375
19	8285	8245	9335	7980	0,00034375
20	8230	8190	9315	7955	0,0003825
21	8240	8180	9295	7935	0,0003925
22	8240	8165	9280	7925	0,0004025
23	8205	8175	9265	7965	0,0004025
26	8165	8145	9260	7935	0,00042875
27	8160	8140	9245	7925	0,0004375
28	8155	8135	9230	7920	0,000445
29	8150	8135	9255	7905	0,00044375
30	8165	8125	9245	7875	0,0004525
33	8115	8115	9220	7875	0,00047375
34	8110	8110	9220	7875	0,00047625
35	8110	8100	9210	7875	0,00048125
36	8105	8020	9210	7875	0,0005025
40	8070	8050	9185	7870	0,00051125
41	8065	8050	9170	7860	0,00051875
44	8055	8035	9165	7850	0,00052875
48	8050	8025	9170	7830	0,00053625
50	8045	8020	9170	7825	0,00054
55	8020	8000	9145	7785	0,0005675
57	8015	8000	9145	7790	0,0005675
61	8005	7985	9140	7790	0,000575
64	8005	7980	9130	7785	0,00058

69	7995	7980	9130	7785	0,0005825
72	7985	7985	9130	7785	0,00058375
79	7970	7975	9120	7780	0,00059375
W/C0,8D		60%RV	20°C		
Ouderdom [dagen]	zijde 1	zijde 2	zijde 3	zijde 4	gem. krimp
1	8560	8490	8590	8500	0
4	8490	8435	8530	8440	6,13E-05
5	8475	8410	8515	8420	0,00008
6	8470	8405	8470	8395	0,0001
7	8470	8395	8465	8365	0,000111
8	8465	8385	8465	8365	0,000115
11	8450	8350	8450	8330	0,00014
12	8445	8350	8440	8345	0,00014
13	8430	8320	8415	8310	0,000166
14	8375	8305	8405	8295	0,00019
15	8370	8285	8380	8290	0,000204
18	8335	8240	8360	8170	0,000259
19	8305	8225	8335	8175	0,000275
20	8305	8175	8260	8170	0,000308
21	8275	8185	8295	8185	0,0003
22	8265	8185	8295	8165	0,000308
25	8240	8165	8265	8160	0,000328
26	8235	8160	8250	8165	0,000333
27	8230	8155	8240	8160	0,000339
28	8195	8145	8240	8145	0,000354
29	8210	8120	8230	8125	0,000364
32	8200	8105	8210	8110	0,000379
33	8200	8100	8205	8105	0,000383
34	8200	8090	8200	8100	0,000388
35	8175	8070	8190	8095	0,000403
39	8175	8065	8160	8085	0,000414
40	8165	8040	8150	8065	0,00043
43	8130	8020	8140	8055	0,000449
47	8125	8005	8130	8050	0,000458
49	8115	7995	8120	8045	0,000466
54	8095	7995	8105	8035	0,000478
56	8090	7980	8090	8020	0,00049
60	8090	7955	8090	8010	0,000499
63	8085	7950	8090	8010	0,000501
68	8080	7940	8075	7995	0,000513
71	8080	7935	8060	7995	0,000518
78	8075	7920	8030	7980	0,000534
W/C0,8E		60%RV	20°C		
Ouderdom [dagen]	zijde 1	zijde 2	zijde 3	zijde 4	gem. krimp
1	8760	8370	8270	8550	0
4	8705	8370	8180	8445	6,25E-05
5	8685	8370	8165	8415	7,88E-05
6	8670	8360	8160	8405	8,88E-05
7	8665	8365	8155	8395	9,25E-05
8	8660	8365	8152	8385	0,000097
11	8645	8350	8140	8375	0,00011
12	8620	8330	8140	8340	0,00013
13	8600	8305	8140	8315	0,000148
14	8590	8290	8140	8315	0,000154
15	8570	8285	8220	8280	0,000149
18	8520	8240	8080	8240	0,000218
19	8515	8225	8065	8230	0,000229
20	8440	8215	8040	8215	0,00026
21	8485	8195	7955	8215	0,000275
22	8465	8185	7860	8185	0,000314

25	8450	8170	7840	8160	0,000333
26	8445	8160	7835	8255	0,000314
27	8440	8150	7840	8145	0,000344
28	8460	8125	7885	8165	0,000329
29	8430	8120	7960	8160	0,00032
32	8395	8105	7925	8135	0,000348
33	8395	8100	7925	8125	0,000351
34	8390	8090	7920	8125	0,000356
35	8385	8070	7910	8120	0,000366
39	8360	8065	7870	8085	0,000393
40	8360	8045	7860	8075	0,000403
43	8320	8025	7840	8060	0,000426
47	8320	8010	7830	8060	0,000433
49	8310	7990	7830	8060	0,00044
54	8300	7980	7805	8030	0,000459
56	8285	7960	7795	8020	0,000473
60	8275	7950	7780	8020	0,000481
63	8270	7950	7775	8020	0,000484
68	8265	7950	7765	8015	0,000489
71	8260	7945	7765	8010	0,000493
78	8250	7945	7755	8010	0,000498
W/C0,8F		60%RV	20°C		
Ouderdom [dagen]	zijde 1	zijde 2	zijde 3	zijde 4	gem. krimp
1	8560	8370	8540	8520	0
4	8460	8360	8430	8450	7,25E-05
5	8460	8350	8410	8435	8,38E-05
6	8445	8345	8395	8420	9,63E-05
7	8440	8325	8390	8410	0,000106
8	8437	8322	8387	8405	0,00011
11	8397	8285	8360	8387	0,00014
12	8375	8265	8340	8385	0,000156
13	8355	8210	8335	8365	0,000181
14	8340	8200	8335	8365	0,000188
15	8335	8195	8330	8360	0,000193
18	8275	8135	8245	8285	0,000263
19	8270	8115	8240	8260	0,000276
20	8225	8095	8225	8260	0,000296
21	8245	8090	8205	8260	0,000298
22	8215	8075	8120	8225	0,000339
25	8205	8060	8100	8210	0,000354
26	8200	8060	8085	8190	0,000364
27	8195	8055	8070	8175	0,000374
28	8180	8025	8160	8165	0,000365
29	8160	8025	8135	8165	0,000376
32	8160	8020	8105	8130	0,000394
33	8155	8010	8105	8120	0,0004
34	8155	8005	8095	8110	0,000406
35	8135	7980	8095	8090	0,000423
39	8115	7965	8060	8060	0,000448
40	8115	7960	8050	8060	0,000451
43	8085	7950	8020	8045	0,000473
47	8080	7935	8020	8035	0,00048
49	8080	7925	8015	8020	0,000488
54	8060	7915	7980	7980	0,000514
56	8055	7915	7970	7970	0,00052
60	8050	7910	7960	7960	0,000528
63	8050	7905	7960	7950	0,000531
68	8045	7895	7960	7950	0,000535
71	8045	7895	7965	7945	0,000535
78	8040	7885	7950	7935	0,000545

W/C0,7A; 95%RV; 20°C					
Ouderdom [dagen]	zijde 1	zijde 2	zijde 3	zijde 4	gem. krimp
1	8390	8790	8540	8540	0
2	8380	8765	8525	8525	1,625E-05
3	8375	8760	8522	8520	2,075E-05
6	8342	8725	8485	8477	5,775E-05
7	8310	8690	8490	8470	0,000075
8	8230	8640	8460	8460	0,0001175
9	8290	8665	8450	8450	0,0001013
10	8270	8660	8445	8415	0,0001175
13	8245	8630	8415	8375	0,0001488
14	8240	8570	8400	8365	0,0001713
15	8235	8585	8405	8350	0,0001713
16	8205	8585	8400	8365	0,0001763
17	8225	8585	8385	8345	0,00018
20	8185	8560	8365	8310	0,00021
21	8160	8555	8340	8275	0,0002325
22	8185	8575	8345	8270	0,0002213
23	8095	8565	8355	8305	0,000235
24	8200	8580	8345	8345	0,0001975
27	8190	8565	8360	8350	0,0001988
28	8190	8565	8355	8345	0,0002013
29	8190	8565	8355	8345	0,0002013
30	8185	8565	8345	8335	0,0002075
34	8170	8550	8340	8320	0,00022
35	8160	8550	8340	8320	0,0002225
37	8160	8535	8335	8320	0,0002275
42	8175	8560	8365	8340	0,000205
44	8175	8580	8380	8320	0,0002013
49	8180	8580	8360	8320	0,000205
51	8185	8585	8355	8325	0,0002025
55	8180	8595	8360	8325	0,0002
58	8180	8590	8355	8325	0,0002025
63	8180	8585	8355	8320	0,000205
66	8185	8580	8355	8320	0,000205
73	8180	8580	8360	8320	0,000205
W/C0,7B; 95%RV; 20°C					
Ouderdom [dagen]	zijde 1	zijde 2	zijde 3	zijde 4	gem. krimp
1	8510	8560	8110	0	0
2	8490	8535	8100	0,00002	1,88E-05
3	8485	8532	8095	0,00003	2,45E-05
6	8445	8492	8052	0,000095	7,15E-05
7	8425	8485	8045	0,00011	8,38E-05
8	8405	8475	8020	0,000125	0,000101
9	8375	8470	8020	0,00012	0,000109
10	8385	8445	8000	0,00014	0,000123
13	8370	8440	7980	0,00021	0,00015
14	8360	8395	7915	0,00019	0,000175
15	8335	8390	7945	0,000185	0,000174

16	8305	8375	7920	0,00019	0,000193
17	8295	8395	7915	0,0002	0,000194
20	8225	8345	7885	0,000225	0,000238
21	8200	8320	7860	0,000245	0,000261
22	8245	8360	7840	0,00024	0,000244
23	8315	8365	7890	0,00021	0,000205
24	8295	8365	7890	0,000215	0,000211
27	8290	8370	7895	0,000215	0,00021
28	8305	8370	7890	0,00022	0,000209
29	8285	8365	7885	0,000215	0,000215
30	8275	8350	7880	0,000215	0,000223
34	8275	8345	7875	0,000235	0,00023
35	8270	8340	7860	0,000235	0,000236
37	8265	8330	7850	0,00024	0,000244
42	8260	8320	7850	0,00025	0,00025
44	8255	8320	7850	0,000245	0,00025
49	8255	8320	7850	0,000245	0,00025
51	8255	8315	7855	0,000245	0,00025
55	8255	8315	7855	0,00025	0,000251
58	8255	8315	7855	0,00025	0,000251
63	8255	8325	7855	0,00025	0,000249
66	8255	8320	7855	0,000255	0,000251
73	8260	8315	7855	0,000245	0,000249
W/C0,8C; 95%RV; 20°C					
Ouderdom [dagen]	zijde 1	zijde 2	zijde 3	zijde 4	gem. krimp
1	8565	8655	8660	0,00033	-9,3E-05
2	8380	8600	8645	0,000335	-2,8E-05
3	8405	8615	8640	0,00038	-2,5E-05
4	8390	8600	8625	0,000385	-1,3E-05
7	8375	8575	8590	0,000385	6,25E-06
8	8375	8575	8575	0,000415	1,75E-05
9	8360	8565	8580	0,00042	2,38E-05
10	8355	8525	8585	0,00041	3,13E-05
11	8355	8525	8535	0,00043	4,88E-05
14	8345	8490	8505	0,000465	7,63E-05
15	8300	8470	8470	0,0005	0,00011
16	8295	8480	8480	0,000475	0,0001
17	8325	8500	8575	0,000625	0,000101
18	8305	8495	8495	0,00045	8,38E-05
21	8305	8480	8495	0,00045	8,75E-05
22	8300	8475	8515	0,000465	8,88E-05
23	8300	8470	8510	0,000475	9,38E-05
24	8300	8470	8505	0,00048	9,63E-05
28	8295	8460	8505	0,00048	0,0001
29	8300	8465	8500	0,000495	0,000103
32	8290	8465	8500	0,000495	0,000105
36	8290	8455	8500	0,0005	0,000109
38	8295	8450	8500	0,0005	0,000109
43	8295	8455	8500	0,0005	0,000108
45	8290	8475	8525	0,00049	0,000095
49	8290	8475	8520	0,00049	9,63E-05

52	8290	8475	8510	0,000495	0,0001
57	8290	8475	8515	0,00049	9,75E-05
60	8295	8475	8515	0,000495	9,75E-05
67	8295	8480	8510	0,000495	9,75E-05
W/C0,8D; 95%RV; 20°C					
Ouderdom [dagen]	zijde 1	zijde 2	zijde 3	zijde 4	gem. krimp
1	8470	8320	8470	0,000115	8,75E-06
2	8435	8315	8415	0,000135	3,75E-05
3	8390	8310	8390	0,00014	5,75E-05
4	8400	8290	8385	0,000155	0,000065
7	8375	8235	8370	0,00021	0,000103
8	8370	8275	8320	0,000185	0,0001
9	8355	8260	8305	0,00021	0,000118
10	8365	8265	8305	0,0002	0,000111
11	8365	8255	8295	0,0002	0,000116
14	8325	8215	8255	0,000225	0,000153
15	8290	8200	8250	0,000255	0,000174
16	8300	8205	8240	0,00027	0,000176
17	8285	8225	8295	0,00035	0,000181
18	8310	8225	8250	0,00026	0,000164
21	8295	8195	8245	0,000275	0,00018
22	8305	8205	8245	0,00026	0,000171
23	8300	8200	8240	0,00027	0,000178
24	8290	8190	8235	0,00028	0,000186
28	8285	8170	8235	0,00028	0,000193
29	8270	8175	8240	0,000285	0,000195
32	8265	8165	8230	0,00029	0,000203
36	8260	8160	8230	0,0003	0,000208
38	8260	8165	8230	0,0003	0,000206
43	8255	8165	8220	0,0003	0,00021
45	8255	8165	8220	0,0003	0,00021
49	8255	8175	8215	0,0003	0,000209
52	8255	8175	8210	0,0003	0,00021
57	8255	8175	8210	0,0003	0,00021
60	8255	8175	8200	0,0003	0,000213
67	8255	8170	8200	0,000295	0,000213

Bijlage H Vochtmetingen

In het beginstadium werd voor de sensor op 7,5cm diepte per seconde de relatieve vochtigheid en temperatuur geregistreerd, later om de tien minuten. Voor de twee andere sensoren werden beide waarden ook op onregelmatige tijdstippen opgemeten. Uiteraard zou het té vergaand zijn om alle meetgegevens mee te geven, daarom werd een selectie gemaakt.

Sensor op 3cm diepte

Tijdstip	RV [%]	Temp [°C]	Tijdstip	RV [%]	Temp [°C]
16/02/2012 15:40	95,18	16,34	1/03/2012 12:06	98,11	20,65
17/02/2012 8:20	99,11	19,97	1/03/2012 12:11	98,13	20,62
17/02/2012 8:45	Ontkist		1/03/2012 12:16	98,05	20,71
17/02/2012 9:15	99,05	19,59	1/03/2012 12:21	98,20	20,60
17/02/2012 13:00	99,15	19,20	1/03/2012 12:26	97,98	20,76
17/02/2012 14:20	99,18	19,16	1/03/2012 12:31	98,34	20,52
20/02/2012 16:25	99,75	19,43	1/03/2012 12:36	98,07	20,74
21/02/2012 8:15	99,88	19,80	1/03/2012 12:46	97,98	20,79
21/02/2012 12:00	99,72	20,01	5/03/2012 11:24	Sensor eruit gehaald	
21/02/2012 13:00	100,00	19,89	5/03/2012 11:24	97,48	19,3
21/02/2012 17:30	Proefstuk gekanteld		5/03/2012 11:24	97,43	19,32
22/02/2012 8:18	97,49	20,89	5/03/2012 11:25	97,43	19,37
22/02/2012 9:31	99,41	19,53	5/03/2012 11:25	97,34	19,4
22/02/2012 14:32	99,21	19,03	5/03/2012 11:25	97,12	19,44
22/02/2012 17:02	99,29	18,99	5/03/2012 11:26	95,44	19,46
23/02/2012 7:22	99,55	18,42	5/03/2012 11:26	95,22	19,45
23/02/2012 7:52	99,04	18,78	5/03/2012 11:26	93,84	19,32
23/02/2012 8:02	98,95	18,89	5/03/2012 11:26	90,26	19,15
23/02/2012 8:12	98,89	18,97	5/03/2012 11:26	86,09	19,1
23/02/2012 13:24	99,11	19,44	5/03/2012 11:26	83,7	19,07
23/02/2012 17:33	99,49	19,43	5/03/2012 11:26	81,86	19,07
23/02/2012 18:11	99,39	19,59	5/03/2012 11:26	80,82	19,05
24/02/2012 8:25	99,45	19,56	5/03/2012 11:26	79,7	19,05
27/02/2012 10:11	99,33	18,97	5/03/2012 11:26	78,85	19,03
27/02/2012 13:24	99,29	19,01	5/03/2012 11:26	78,61	19,09
28/02/2012 8:00	Proefstuk rechtop		5/03/2012 11:27	77,8	19,08
28/02/2012 8:19	99,08	19,1	5/03/2012 11:27	77,02	19,21
29/02/2012 18:08	98,57	20,62	5/03/2012 11:27	75,34	19,27
1/03/2012 8:42	98,14	20,60	5/03/2012 11:27	75,18	19,29
1/03/2012 11:52	98,02	20,71	5/03/2012 11:28	74,68	19,32
1/03/2012 11:56	98,08	20,61	5/03/2012 11:28	74,55	19,28
1/03/2012 12:01	97,94	20,75			

Sensor op 7,5cm diepte

Tijdstip	RV [%]	Temp [°C]	Tijdstip	RV [%]	Temp [°C]
16/02/2012 15:40	92,95	16,86	8/03/2012 21:25	95,63	19,6
16/02/2012 16:45	94,03	17,39	10/03/2012 9:51	95,09	19,25
16/02/2012 18:45	94,92	17,99	11/03/2012 21:51	94,7	20,16
16/02/2012 20:46	95,26	18,59	13/03/2012 10:55	94,27	20,89
16/02/2012 22:47	95,54	19,23	14/03/2012 22:55	93,96	20,57
17/02/2012 0:47	95,78	19,75	16/03/2012 11:11	93,51	20,33
17/02/2012 2:48	95,94	20,14	17/03/2012 23:57	93,17	20,37
17/02/2012 4:48	96,12	20,42	19/03/2012 11:57	92,65	20,14
17/02/2012 6:49	96,25	20,56	21/03/2012 0:37	92	20,95
17/02/2012 7:49	96,3	20,57	22/03/2012 12:44	91,43	20,77
17/02/2012 8:45	Ontkist		24/03/2012 0:44	90,93	20,86
17/02/2012 9:15	96,38	20,07	25/03/2012 13:44	90,44	20,59
18/02/2012 1:16	96,93	18,41	27/03/2012 1:51	89,87	20,78
18/02/2012 17:11	97,2	17,95	28/03/2012 14:28	89,67	20,49
19/02/2012 9:07	97,36	17,82	30/03/2012 2:28	88,91	20,8
20/02/2012 1:02	97,35	18,73	31/03/2012 10:45	88,75	20,47
20/02/2012 16:55	97,46	19,27	1/04/2012 22:45	88,05	20,55
21/02/2012 8:55	97,53	19,62	3/04/2012 10:50	87,72	20,63
21/02/2012 13:10	97,61	19,77	4/04/2012 23:15	87,23	20,83
21/02/2012 17:12	97,63	19,62	6/04/2012 11:33	86,98	20,25
21/02/2012 17:30	Proefstuk gekanteld		7/04/2012 23:33	86,46	20,49
21/02/2012 21:25	96,95	19,79	9/04/2012 11:33	86,05	19,82
22/02/2012 8:34	96,83	20,02	10/04/2012 23:33	85,76	20,31
23/02/2012 12:12	96,76	19,99	12/04/2012 11:46	85,17	19,96
23/02/2012 17:45	96,78	20,3	14/04/2012 0:02	84,95	20,49
24/02/2012 2:03	96,86	20,42	15/04/2012 12:02	84,55	19,74
24/02/2012 14:35	96,55	20,89	19/04/2012 13:00	83,43	20,35
25/02/2012 2:40	96,77	21	21/04/2012 1:03	83,64	20,49
25/02/2012 14:40	96,7	20,96	22/04/2012 13:03	83,15	20,22
26/02/2012 2:40	96,81	20,9	24/04/2012 1:10	82,89	20,53
26/02/2012 14:40	96,81	20,16	25/04/2012 13:12	82,51	20,53
27/02/2012 2:40	96,88	19,91	27/04/2012 1:12	82,32	20,42
28/02/2012 8:00	Proefstuk rechtop		28/04/2012 13:18	82,2	20,39
28/02/2012 16:20	97,45	19,54	30/04/2012 1:18	81,69	20,64
1/03/2012 4:49	96,6	19,8	1/05/2012 13:25	81,46	20,5
2/03/2012 18:32	96,41	20,25	3/05/2012 1:28	80,85	20,31
4/03/2012 6:32	96,35	19,76	4/05/2012 13:39	80,61	20,47
5/03/2012 20:15	96,17	19,35	6/05/2012 1:47	80,03	20,37
7/03/2012 8:55	95,47	19,13	7/05/2012 13:55	79,88	20,56

Sensor op 12cm diepte

Tijdstip	RV [%]	Temp [°C]	Tijdstip	RV [%]	Temp [°C]
16/02/2012 15:40	94,13	17,00	9/03/2012 8:25	91,54	18,67
17/02/2012 8:20	98,30	20,55	9/03/2012 9:00	91,47	18,67
17/02/2012 8:45	Ontkist		9/03/2012 12:01	91,41	18,76
17/02/2012 9:15	98,28	20,05	9/03/2012 12:10	91,41	18,74
17/02/2012 13:00	98,82	18,70	9/03/2012 12:20	91,39	18,76
17/02/2012 14:20	98,88	18,58	9/03/2012 12:30	91,41	18,73
20/02/2012 16:25	99,34	18,26	9/03/2012 12:40	91,36	18,76
21/02/2012 8:15	99,33	18,74	9/03/2012 12:50	91,34	18,78
21/02/2012 12:00	99,39	18,88	9/03/2012 12:58	91,36	18,76
21/02/2012 13:10	99,36	19,05	12/03/2012 11:14	89,92	19,10
21/02/2012 17:30	Proefstuk gekanteld		15/03/2012 10:45	88,57	19,63
22/02/2012 8:23	98,99	18,73	15/03/2012 17:10	88,33	20,21
22/02/2012 9:32	98,8	18,96	16/03/2012 14:20	88,08	20,17
22/02/2012 11:18	98,66	19,14	19/03/2012 14:31	86,51	19,96
23/02/2012 8:16	98,46	19,16	20/03/2012 15:32	86,16	20,45
23/02/2012 13:24	98,34	19,62	26/03/2012 13:10	83,53	20,27
23/02/2012 17:34	98,31	19,88	27/03/2012 9:53	83,04	20,37
23/02/2012 18:12	98,33	19,90	28/03/2012 13:27	82,82	20,2
24/02/2012 8:26	98,06	19,81	3/04/2012 14:02	80,92	20,31
24/02/2012 10:35	98,02	19,83	4/04/2012 14:15	80,62	20,41
24/02/2012 12:54	97,99	20,04	5/04/2012 14:06	80,53	20,31
24/02/2012 16:09	97,87	20,40	11/04/2012 8:28	79,11	19,73
27/02/2012 8:28	96,75	19,62	11/04/2012 15:24	78,93	20,28
27/02/2012 10:12	96,7	19,62	12/04/2012 9:16	78,91	19,55
27/02/2012 13:25	96,81	19,42	12/04/2012 15:13	78,8	20,11
28/02/2012 8:00	Proefstuk rechtop		13/04/2012 13:21	78,55	19,83
28/02/2012 8:20	96,38	19,53	16/04/2012 10:32	77,91	19,82
29/02/2012 18:09	95,16	19,58	19/04/2012 10:20	77,56	19,73
1/03/2012 8:42	94,51	19,29	23/04/2012 8:10	76,83	20,03
1/03/2012 13:13	94,43	19,62	24/04/2012 8:12	76,59	20,11
1/03/2012 17:11	94,44	19,87	27/04/2012 15:28	75,82	20,31
5/03/2012 8:32	93,07	18,59	30/04/2012 10:42	75,50	20,16
5/03/2012 15:45	92,83	18,94	3/05/2012 8:49	74,65	20,01
6/03/2012 14:00	92,60	18,95	4/05/2012 17:16	74,05	20,47
7/03/2012 10:05	92,25	18,91	7/05/2012 9:24	74,26	20,19
7/03/2012 17:35	92,27	18,99	8/05/2012 13:01	73,9	20,26
8/03/2012 10:07	91,95	18,87	10/05/2012 8:54	73,24	20,41
8/03/2012 16:35	91,83	19,17			

Bijlage I Afschuiving zand-cement

Experimentele waarden afschuif- en splijtsterkte

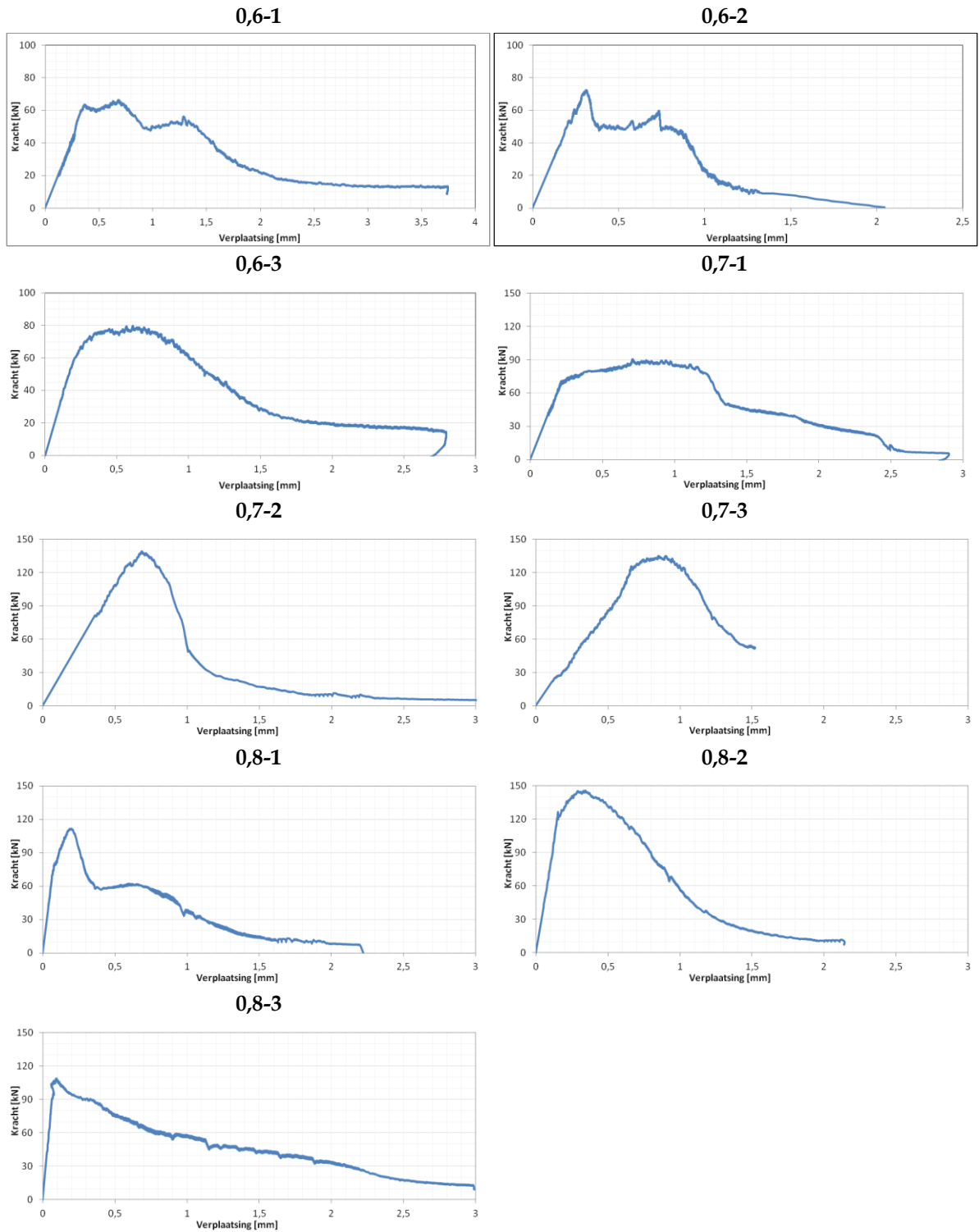
Proefstuk	Afmetingen breukvlak		Afschuifkracht (kN)	Afschuifsterkte (N/mm ²)	Breuklast (kN)	Splijttreksterkte (N/mm ²)	Ouderdom (dagen)
	Lengte (mm)	Hoogte (mm)					
0,6-1-1	151,98	153,58			41,5	1,13	0,6
			66,34	1,42			
0,6-1-2	154,4	152,2			46,5	1,26	0,6
0,6-2-1	153,98	150,47			42	1,15	0,6
			72,45	1,56			
0,6-2-2	153,37	150,86			50,5	1,39	0,6
0,6-3-1	152,48	151,72			40	1,10	0,6
			79,73	1,71			
0,6-3-2	154,36	151,73			40,5	1,10	0,6
0,7-1-1	148,71	150,96	90,68	2,02	46,5	1,32	0,7
0,7-2-1	153,7	151,76			57,5	1,57	0,7
			139,05	3,01			
0,7-2-2	152,17	150,61			39	1,08	0,7
0,7-3-1	151,37	151,27			46	1,28	0,7
			134,92	2,95			
0,7-3-2	150,44	151,43			45,5	1,27	0,7
0,8-1-1	151,37	152,27			60,5	1,67	0,8
			111,51	2,41			
0,8-1-2	154,72	150,32			50,5	1,38	0,8
0,8-2-1	153,68	150,91			48,5	1,33	0,8
			145,51	3,14			
0,8-2-2	153,5	151,5			52	1,42	0,8
0,8-3-2	155,34	150,76	109,05	2,34	43	1,17	0,8

Theoretisch model afschuiving

	0,7-1	0,7-2	0,7-3	0,8-1	0,8-2	0,8-3
Punt 1-s	0	0	0	0	0	0
Punt 1-tau	0	0	0	0	0	0
Punt 2-s	0,71	0,69	0,85	0,20	0,34	0,09
Punt 2-tau	2,02	3,01	2,95	2,41	3,14	2,34
Punt 3-s	2,02	1,03	1,55	0,96	1,06	1,86
Punt 3-tau	0,67	1,03	1,00	0,83	1,08	0,81
Punt 4-s	3	3	3	3	3	3
Punt 4-tau	0	0	0	0	0	0

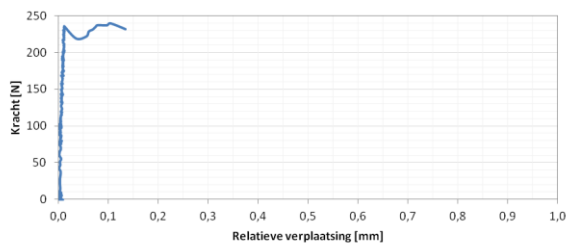
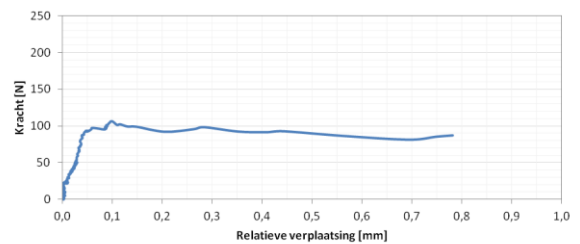
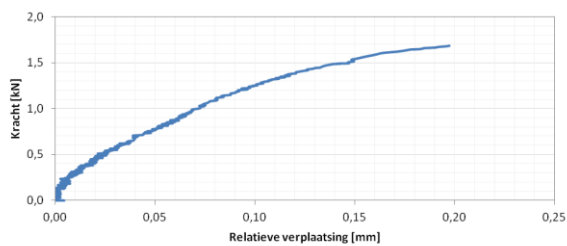
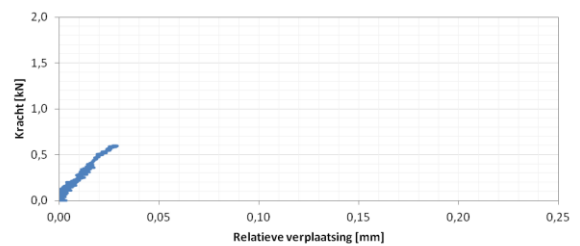
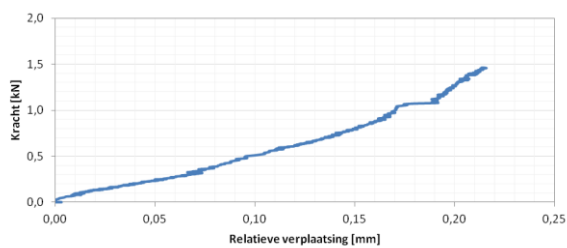
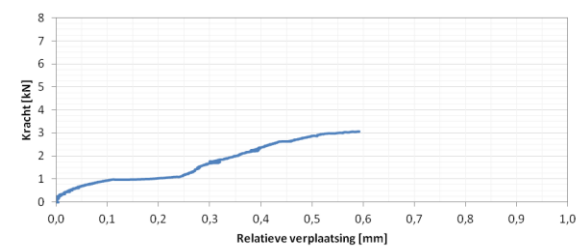
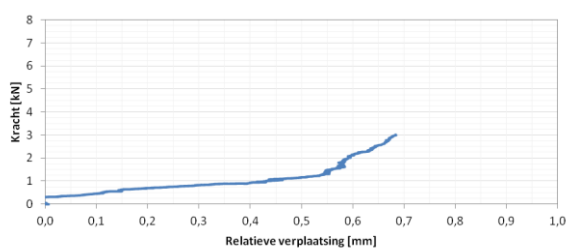
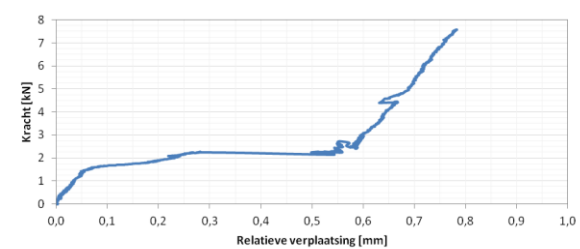
Bijlage J Grafieken afschuiving zand-cement

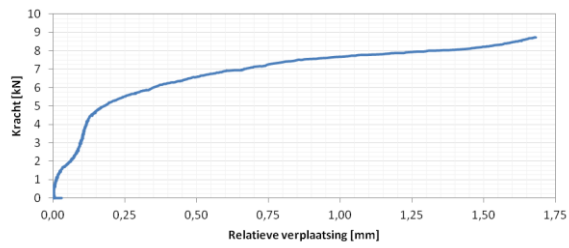
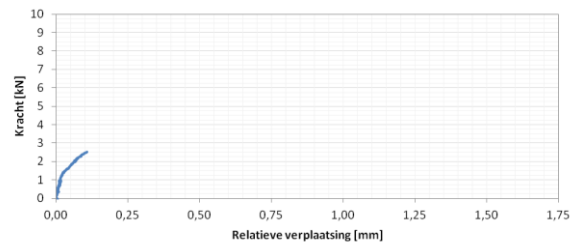
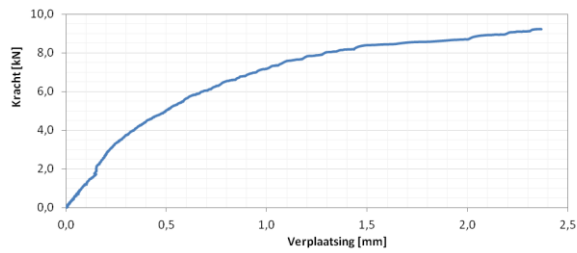
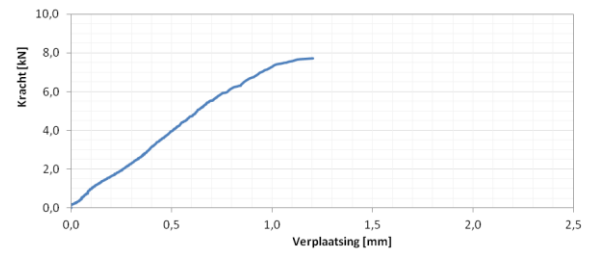
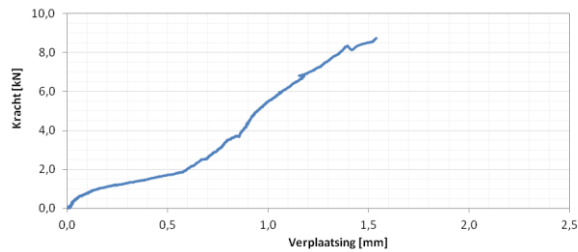
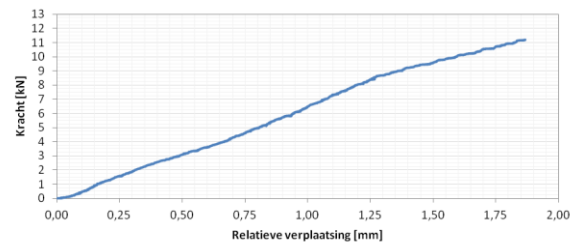
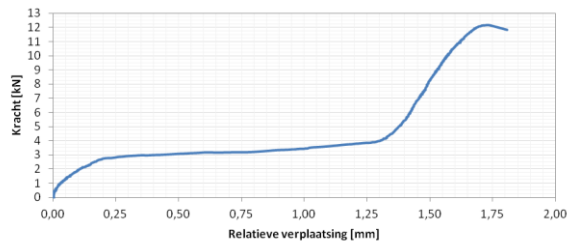
Voor $W/C=0,6$ worden de grafieken gegeven met de absolute verplaatsing van het midden. Er wordt voor het begin gebruik gemaakt van een lineaire trend. Voor $W/C=0,7$ en $0,8$ zijn het de relatieve verplaatsingen die weergegeven worden waarin het eerste deel eveneens lineair aangenomen wordt.



Bijlage K Grafieken afschuiving zand-cement op betonnen ondergrond

Er wordt op de x-as telkens de relatieve verplaatsing weergegeven van het zand-cement ten opzichte van het beton. De proefstukken met zelfde oppervlakteruwheid en water/cement-factor worden met dezelfde assen weergegeven.

0,6-Glad-2**0,6-Glad-3****0,6-Ruw-1****0,6-Ruw-2****0,6-Ruw-3****0,8-Glad-1****0,8-Glad-2****0,8-Glad-3**

0,8-Glad-Groot-1**0,8-Glad-Groot-2****0,8-Ruw-1****0,8-Ruw-2****0,8-Ruw-3****0,8-Ruw-Groot-1****0,8-Ruw-Groot-2**

Bijlage L Technische fiches lijm



P.T.B.-KLEEFCEMENT PLUS

CE		
BWSA POLYTECHNISCHE BEDRIJF SPRL Industriepark - Zwijperdreef 8 B-4020 Ghist België		
06		
EN 12004		
Cementgebonden tegellijm/wand en muurlijm en buiten Ciment colle-murs et sols intérieurs et extérieurs Cementitious adhesive floors and walls internal and external Zementbinder Klebmittel/Boden und Wandkleben und Aussen		
EN 1345 § 6.2	≥ 0,5 N/mm ²	C1
EN 1345 § 6.3	≥ 0,5 N/mm ²	C1
EN 1345 § 6.4	≥ 0,5 N/mm ²	C1
EN 1345 § 6.5	≥ 0,5 N/mm ²	C1

C1

BWSA POLYTECHNISCHE BEDRIJF SPRL
is CEI ISO 9001:2008 gecertificeerd
NEN EN ISO 9001:2008 gecertificeerd
NEN ISO 9001:2008 gecertificeerd
NEN ISO 9001:2008 gecertificeerd

Certificaat/Certificat/Certificat/Certificat: BE 04 1422 DA

Eigenschappen



+30°

+5°

Tegellijm voor binnen en buiten



P.T.B.-KLEEFCEMENT PLUS is een droge samenstelling die door eenvoudige toevoeging van water een gebruiksklare lijm geeft.

Deze lijm verzekert een aanhechting die na zeven dagen uitharding deze van een traditionele mortel tot vijf à zes maal overtreft. Afgezien van deze absolute zekerheid op gebied van aanhechting, bezit P.T.B.-KLEEFCEMENT PLUS een buitengewone verwerkbaarheid.

Door zijn eenvoud en beproefde samenstelling laat P.T.B.-KLEEFCEMENT PLUS een vlugge plaatsing toe met een maximum rendement.

Met P.T.B.-KLEEFCEMENT PLUS kunnen zowel binnen als buiten volgende materialen gekleefd worden als bv. faïence, keramiek, mozaïek, en dit op een ondergrond zoals bv. beton, metselwerk, cementeerwerk, cellenbeton.

Het gebruik van P.T.B.-KLEEFCEMENT PLUS wordt afgeraden op volgende draagvlakken: gipsbepleisteringen, gespoten gips en dgl., houtvezelplaten, fineerplaten, enz... welke ten gevolge van de vochtigheid vormveranderingen kunnen ondergaan en te weinig coherent zijn. Het gebruik van FLEXcement* en FLEXcement* PLUS zijn in dergelijke gevallen aangewezen.

Zie ook P.T.B.-PASTAFIX.

TECHNISCHE PARAMETERS

Voldoet aan eis volgens
NBN EN 12004
MPa (N/mm²)

Initiële hechting (C1)	≥ 0,5
Hechting na onderdompeling in water (C1)	≥ 0,5
Hechting na veroudering bij + 70°C (C1)	≥ 0,5
Hechting na vorst-dooicycli (C1)	≥ 0,5
Hechting na opentijd van 20 minuten	≥ 0,5

Mengverhouding	Verbruik	Verpakking
± 5,75 L water per zak van 25 kg (± 23%)	± 1,5 kg/mm/m ² in poeder	5 & 25 kg
Kleur	Verwerkingstijd	Gebruikstemperatuur
Grijs en wit	± 3h	+ 5°C tot + 30°C

P.T.B.-KLEEFCEMENT PLUS

Gebruiksaanwijzing

Er wordt steeds gewerkt op een zuivere, gezonde, stof- en olievrije ondergrond welke geen vormveranderingen meer kan ondergaan (bv. krimp). P.T.B.-KLEEFCEMENT PLUS wordt aangemaakt met ongeveer 23% water t.t.z. ongeveer 5,75 L water op 25 kg product. Na zorgvuldige menging laat men de aldus bekomen specie rusten gedurende 5 à 15 minuten. Vervolgens wordt de mortel nogmaals intens omgeroerd. De mortel is nu klaar voor het gebruik.

Op de ondergrond brengt men eerst een dunne laag met een truweel of getande spaan aan. Deze laag wordt stevig aangedrukt. Men brengt onmiddellijk daarna een tweede laag op, die men met een getande spaan (lijmkam 4 tot 10 mm) in regelmatige rillen verdeelt. Vervolgens worden de tegels met een kleine draaiende beweging stevig aangedrukt. De opentijd van de aangebrachte laag is afhankelijk van de werkomstandigheden en de ondergrond.

Het voegwerk (P.T.B.-JOINT HY, P.T.B.-FILLER of P.T.B.-JOINT-BREED) wordt pas uitgevoerd wanneer de lijm voldoende weerstand heeft (afhankelijk van temperatuur en luchtvochtigheid - minstens 24h wachten). Zie ook ons product P.T.B.-DIKBED-FLEX.

Opmerkingen

- Het contactoppervlak tussen tegel en lijm moet minimaal 80% bedragen. Voor toepassingen buiten en sterk belaste oppervlakten wordt een volledige verlijming aanbevolen.
- De voegconstructie wordt dusdanig opgevat dat de optredende spanningen (bv. ten gevolge van dilatatie) door het tegelvlak kunnen opgevangen worden. Inklemmingen tegen plafond, vloer, kolommen, enz. dienen vermeden te worden; uitzettingsvoegen in het draagvlak moeten in het tegelvlak hernomen worden. Al deze voegen worden met een elastische voegenkit (P.T.B.-SILICONE SN) afgedicht.
- In sommige gevallen kan een grondlaag met COMPAKTUNA* (PRO)/wateroplossing (1/4) of P.T.B.-PRIMER noodzakelijk zijn.

Verpakking

P.T.B.-KLEEFCEMENT PLUS is leverbaar in grijze en witte kleur, in zakken van 25 kg en 5 kg. Iedere zak van 25 kg bevat een polyethyleen zak. De houdbaarheid is 12 maanden in de originele, gesloten verpakking en droog bewaard.



Raadpleeg onze "Technische Dienst". Deze is kosteloos ter beschikking. De toepassingen en verwerkingsmogelijkheden van onze producten zijn talrijk, zodat geen gelijkvormige aanwending kan voorgeschreven worden. De aansprakelijkheid van onze vennootschap is beperkt tot de wettelijke aansprakelijkheid. Alle productinformatie en aanbevelingen in deze productfiche geven onze stand van kennis weer op het moment van uitgave. Een toekomstige actualisering en aanpassing kan ons in geen geval ten laste gelegd worden.



P.T.B.-COMPACTUNA®
Industriepark - Zwinaarde 8
9052 Gent - België
Tel.: +32 9 221 11 16
Fax.: +32 9 221 85 01
RPR Gent RPM
E-mail: info@compactuna.be
Website: www.compactuna.be
Ons groen nummer: 0800/92279



BVBA POLYTECHNISCH BEDRUF
EN ISO 9001:2008 gecertificeerd
Certificaat: BE 04/1432 QA



FLEXcement®

Flexibele bouw- en tegellijm



Eigenschappen

FLEXcement® is een droge samenstelling die door eenvoudige toevoeging van water een gebruiksklare lijm geeft met grote "flexibiliteit".

FLEXcement® heeft als bijzondere eigenschappen:

1. Een buitengewone **aanhechting** die deze van de traditionele klee cementen ruim overtreft.
2. Een merkwaardige **elasticiteit** die men bij de traditionele klee cementen niet terugvindt. FLEXcement® heeft een verhoogde weerstand tegen schuifspanningen. Dit laat FLEXcement® toe om de pastalijmen (voor verlijmingen op bv. spaanderplaten) economisch te vervangen.
3. Een **geheel van kwaliteiten** die in moeilijke gevallen een oplossing brengt. FLEXcement® brengt bv. de oplossing in talrijke toepassingen om tegels op tegels te verkleven (enkel voor binnenwerk).

FLEXcement® bestrijkt niet alleen het domein van de traditionele klee cementen en pastalijmen, maar vindt talrijke toepassingen waar deze producten geen oplossingen meer kunnen geven.

Met FLEXcement® kunnen zowel binnen als buiten volgende materialen gekleefd worden: faience, keramiek, mozaïek, enz., en dit op een ondergrond zoals bv. beton, metselwerk, cementeerwerk, cellenbeton, spaanderplaten, fineerplaten, enz. Zelfs het kleven van tegels op tegels (binnen) is mogelijk met FLEXcement®. Vloeren met vloerverwarming kunnen eveneens met FLEXcement® betegeld worden (maximaal tegelformaat bij vloerverwarming is 60 x 60 cm). Voor het plaatsen van natuursteen raden we u aan om de gehele plaat met lijm in te strijken en niet met noppen te werken. Het verlijmen van bepaalde natuurstenen (vb. marmer) moet gebeuren met FLEXcement® wit.

TECHNISCHE PARAMETERS

Voldoet aan eis volgens
NBN EN 12004
MPa (N/mm²)

Initiële hechting (C2)	≥ 1
Hechting na onderdompeling in water (C2)	≥ 1
Hechting na veroudering bij + 70°C (C2)	≥ 1
Hechting na vorst-dooi cycli (C2)	≥ 1
Hechting na opentijd van 20 minuten	≥ 0,5
Hechting na opentijd van 30 minuten (E)	≥ 0,5
Verticale glijweerstand (T)	≤ 0,5 mm
Flexibiliteit (S1 volgens EN 12002)	≥ 2,5 mm

Mengverhouding	Verbruik	Verpakking
± 6 L water per zak van 25 kg (± 24%)	± 1,4 kg/mm/m ² in poeder	5 & 25 kg
Kleur	Verwerkingstijd	Gebruikstemperatuur
Grijs & wit	± 3h	+ 5°C tot + 30°C

FLEXcement®

Gebruiksaanwijzing

Er wordt steeds gewerkt op een zuivere, gezonde, stof- en olievrije ondergrond. Sterk zuigende ondergronden worden vooraf met een COMPAKTUNA* (PRO)/wateroplossing (1/4) of met P.T.B.-PRIMER ingestreken. Platen dienstdoende als ondergrond moeten steeds stabiel bevestigd zijn vóór de plaatsing der tegels aanvangt. FLEXcement* wordt aangemaakt met ongeveer 24% water t.t.z. ongeveer 6 L water op 25 kg product. Na zorgvuldige menging laat men de aldus bekomen specie rusten gedurende 5 à 15 minuten. Vervolgens wordt de specie nogmaals intens omgeroerd. De lijm is nu klaar voor het gebruik.

Op de ondergrond brengt men eerst een dunne laag met een truweel of getande spaan aan. Deze laag wordt stevig aangedrukt. Men brengt onmiddellijk daarna een tweede laag op, die men met een getande spaan (lijmkam 4 tot 10 mm) in regelmatige rillen verdeelt. Vervolgens worden de tegels met een kleine draaiende beweging stevig aangedrukt. De opentijd van de aangebrachte laag is afhankelijk van de werkomstandigheden en de ondergrond.

Het voegwerk (P.T.B.-JOINT HY, P.T.B.-FILLER of P.T.B.-JOINT-BREED) wordt pas uitgevoerd wanneer de lijm voldoende weerstand heeft (afhankelijk van temperatuur en luchtvochtigheid - minstens 24 uur wachten).

Bijzondere toepassingen

FLEXcement* kan eveneens gebruikt worden om de cementpap te vervangen die men op een verse chape (binnen de 24h) giet bij het plaatsen van tegels op de klassieke manier.

Dit geeft tal van voordelen:

- door zijn hoog kunststofgehalte een elastische, rotsvaste hechting;
- door zijn gelijkmatige verdeling een perfecte plaatsing;
- doordat de lucht van onder de tegel kan ontsnappen, kan men een 100%-ige verkleving bekomen bij groot-formaattegels.

Voor het bekomen van deze brij maakt men FLEXcement* aan met 35% à 40% water t.t.z. 8,5 L tot 10 L water per zak van 25 kg. De menging gebeurt bij voorkeur mechanisch tot men een gladde, plastische brij bekomt. Men laat die ± 10 minuten rusten voor men nogmaals omroert. Daarna giet men de brij uit op de verse cementdekmortel en men verdeelt gelijk met een getande spaan. De tegels worden met een draaiende beweging op hun plaats gebracht. Voor klein-formaattegels gebruikt men een spaan met kleine tanden. Voor groot-formaattegels (30 x 30 cm tot 60 x 60 cm) gebruikt men best een grotere tanding die de onregelmatigheden van zulke tegels beter opvangt.

Opmerkingen

- Het contactoppervlak tussen tegel en lijm moet minimaal 80% bedragen. Voor toepassingen buiten en sterk belaste oppervlakten wordt een volledige verlijming aanbevolen.
- De voegconstructie wordt dusdanig opgevat dat optredende spanningen (bv. ten gevolge van dilatatie) door het tegelvlak kunnen opgevangen worden. Inklemmingen tegen plafond, vloer, kolommen enz... dienen vermeden te worden; uitzettingsvoegen in het draagvlak moeten in het tegelvlak hernomen worden. Al deze voegen worden met een elastische voegenkit (P.T.B.-SILICONE SN) afgedicht.
- In sommige gevallen kan een grondlaag met COMPAKTUNA* (PRO)/wateroplossing (1/4) of P.T.B.-PRIMER (BL) noodzakelijk zijn.
- Bij niet-compatibele ondergronden zoals een anhydriet chape dient de ondergrond te worden voorbehandeld met een COMPAKTUNA* (PRO)/wateroplossing (1/4) of met P.T.B.-PRIMER.

Verpakking

FLEXcement* is verkrijgbaar in grijze en witte kleur, in zakken van 25 kg en 5 kg. Iedere zak van 25 kg bevat een polyethyleenzak.

De houdbaarheid is 12 maanden in de originele, gesloten verpakking en droog bewaard.



Raadpleeg onze Technische Dienst. Deze is kosteloos ter beschikking. De toepassingen en verwerkingsmogelijkheden van onze producten zijn talrijk, zodat geen gelijkvormige aanwending kan voorgeschreven worden. De aansprakelijkheid van onze vennootschap is beperkt tot de wettelijke aansprakelijkheid. Alle productinformatie en aanbevelingen in deze fiche geven onze stand van kennis weer op het moment van uitgifte. Een toekomstige actualisering en aanpassing kan ons in geen geval ten laste gelegd worden.

COMPAKTUNA*

 Tradition & Quality

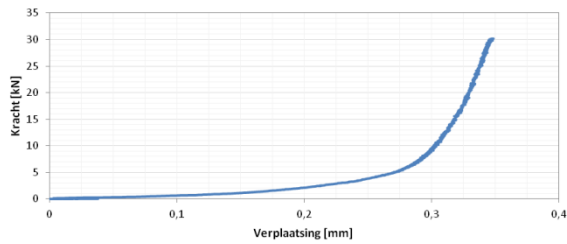
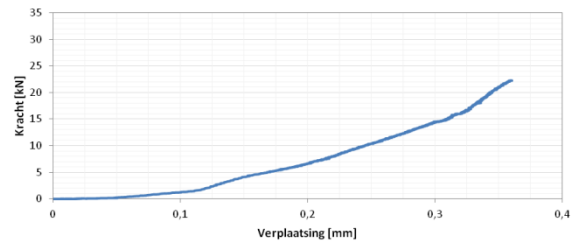
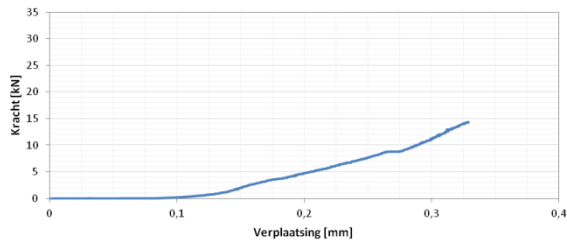
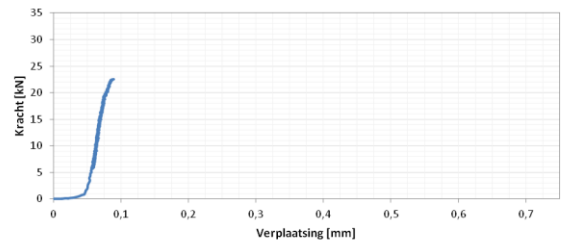
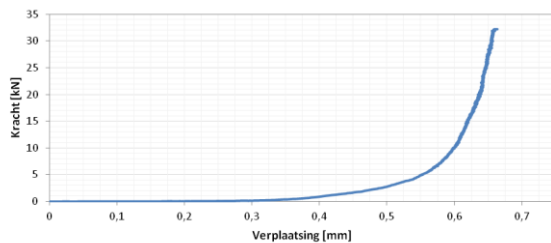
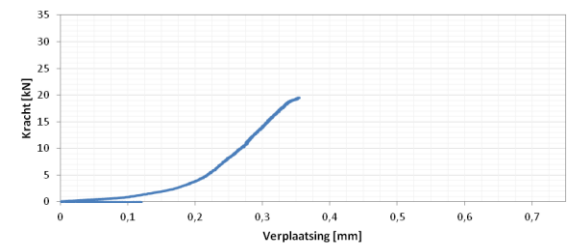
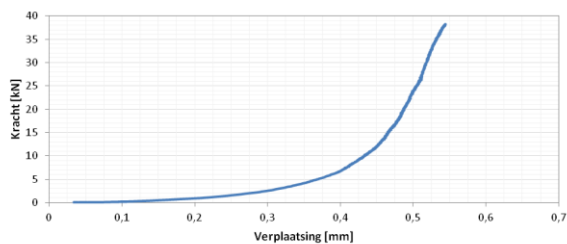
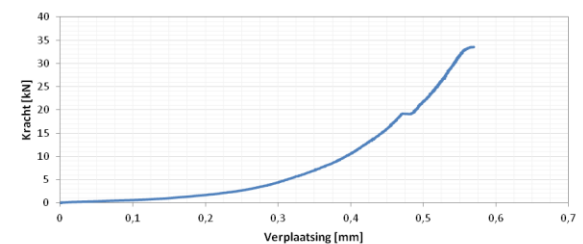
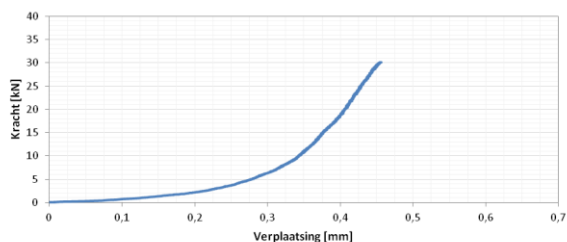
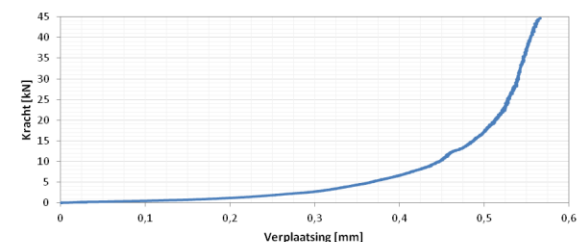
P.T.B.-COMPAKTUNA*
 Industriepark - Zwijnaarde 6
 9052 Gent - Belgium
 Tel.: +32 9 221 11 16
 Fax: +32 9 221 85 01
 RPR Gent RPM
 E-mail: info@compaktuna.be
 Zie onze website www.compaktuna.be
 U kan ons raadplegen op ons groen nr. 0800/92279

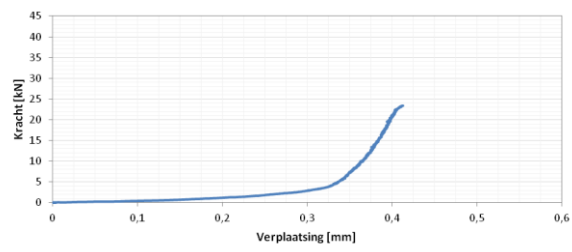


BVBA POLYTECHNISCH BEDRIJF is
 EN ISO 9001:2008 gecertificeerd.
 Certificaat: BE 04/1432 QA

Bijlage M Grafieken afschuiving van tegel gelijmd op zand-cement

Deze grafieken zijn ter bepaling van de maximale slip nog bewerkt door het eerste deel weg te laten van de curve omdat dit ten gevolge van samendrukking van de opstelling niet de slip weergeeft maar een absolute verplaatsing van de lvd't. De gegevens van 0,8-F-2 zijn verloren gegaan.

0,6-K-1**0,6-K-2****0,6-K-3****0,8-K-1****0,8-K-2****0,8-K-3****0,6-F-1****0,6-F-2****0,6-F-3****0,8-F-1**

0,8-F-3

Bibliografie

1. **IWT**. <http://www.iwt.be/>. [Online]
2. **Innovatienetwerk**. <http://www.innovatienetwerk.be/projects/1577>. [Online]
3. **WTCB**. *Dekvloeren. Deel 2: uitvoering*. 1994.
4. **Afbouw, Bedrijfschap**. Met de cementdekvloer heeft u het voor het zeggen. www.bedrijfschapafbouw.nl. [Online]
5. *Dekvloermortels en dekvloeren: eigenschappen en eisen*. **ir. C. Van Ginderachter, ir. B. Parmentier**. : WTCB, 2006, Vol. 4.
6. **Afbouw, Bedrijfschap**. Isolerende dekvloeren: Aandachtspunten bij ontwerp en uitvoering. www.bedrijfschapafbouw.nl. [Online] Maart 2011.
7. **Bossche, Ing. J. Van den**. Loskomen van vloertegels. <http://mobile.wtcb.be/index.cfm/pub/series/14/publications/104013>. [Online] Juli 2011.
8. **Vandewaetere, Vicky**. *De BRE Screed Test: parameteronderzoek*. Oostende : khbo, 2009.
9. **Steen, C.A. van der**. *Het (Dek)vloerenboek*. : Bedrijfschap Afbouw, 2010.
10. **Vloerenmakers, De**. <http://www.devloerenmakers.nl/cementdekvloer.html>. [Online]
11. **Wijnants, Ing. J.** <http://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact27&art=402>. WTCB. [Online]
12. **Dekvloer.net**. Reduceren krimpscheuen - wapeningsnet en wapeningsvezel. www.dekvloeren.net. [Online]
13. **Pontmeyer**. Vezels - harbourite. <http://www.pontmeyer.nl/files/100147%20PI-blad%20harbourite%20vezelsverwerking.pdf>. [Online]
14. **Deelen, Ir. P.F. van**. *Zwevende dekvloeren op thermische of akkoestische isolatie in de woningbouw*. Rotterdam, Nederland : Stichting Bouwresearch, 2001.
15. **WTCB**. *Dekvloeren: Deel 1: Materialen - Prestaties - Kontroles*; TV 189. 1993.
16. **CWM, FME**. *Keuren van lijmen en lijnverbindingen*. 2008.
17. **Bouwresearch, Stichting**. Infoblad 124 - Controleren van de ondergrond voor een vloerafwerking van natuursteen of keramische tegels. <http://www.sbr.nl/producten/infobladen/controleren-van-de-ondergrond-voor-een-vloerafwerking-van-natuursteen-of-keramische-tegels>. [Online]
18. **Weber**. *De gids weber 2011*. Saint-Gobain : F. Beaurain, 2011.

19. **Livios.** Tegels. https://www.livios.be/nl/_build/_fini/_floo/_tile/index.asp?content=Tegels. [Online]
20. **Taerwe, prof.dr.ir. L. en De Schutter, prof.dr.ir. G.** *Betontechnologie*. 2006.
21. **normalisatie, Belgisch instituut voor.** NBN EN 197-1, *Cement - Deel 1: Samenstelling, specificatie en overeenkomstigheidscriteria voor gebruikelijke cementsoorten*. 2000.
22. **normalisatie, Bureau voor.** NBN EN 12620 - *Granulaten voor beton*. 2008.
23. **Veerle Boel, Tinne Vangheel, Tanja Gryspeerit en Peter De Pauw.** *Dekvloeren: "schade en preventie"*. 2011.
24. **Dekvloer.net.** Droogtijd traditionele dekvloer. <http://www.dekvloeren.net/php/index.php?page=91>. [Online]
25. **Afbouw, Bedrijfschap.** Vergelijking zandcementdekvloerkwaliteit NEN 2741:2001 met de NEN 2741:2008 bij keuring in het werk op het aspect druksterkte. www.dekvloerenmakers.nl. [Online] December 2009.
26. **Leistra, Wilbert.** Prestatiecriteria - Nieuwe norm NEN 2741. www.nationalevloerendag.nl. [Online] 2008.
27. **Traasvloeren.** Cementdekvloeren. <http://www.traasvloeren.nl/dekvloeren/cementdek>. [Online]
28. *Het verschijnsel van het scheuren en opwelven van het geheel tegelvloer-dekvloer.* **Wagneur, Ing. M.** : WTCB, 1998, Vol. 1.
29. *Ondergrond afstemmen - NEN-norm met eisen aan dekvloer.* **Steen, Corné van der.** : VTM, 2009, Vol. 5.
30. **normalisatie, Belgisch instituut voor.** NBN EN 13892. *Beproevingmethoden voor dekvloermortels*. 2003.
31. **Felixberger, prof.dr. Josef K.** *Polymer-modified thin-bed tile adhesives*. 2008.
32. **normalisatie, Bureau voor.** NBN EN 1348 *Mortels en lijmen voor tegels - Bepaling van de hechtsterkte voor met cement gebonden mortels*. 2008.
33. **Taerwe, prof.dr.ir. L. en Belie, prof.dr.ir. Nele De.** *Waarschijnlijkheidsrekening en Statistiek*. 2008.
34. **Holcim.**
http://www.holcim.be/fileadmin/templates/BE/doc/Produits_et_services/cement/catalogue/HA_CEMIIBM325N_C0130_NL.pdf. [Online]
35. **normalisatie, Bureau voor.** NBN EN 12390, *Beproeving van verhard beton*. 2009.
36. **Ann van Gysel, Luc Van Hooymissen, Marc Spegelaere, Willy De Vylder.** *Gewapend Beton*. 1999.
37. **normalisatie, Belgisch instituut voor.** NBN B 15-203. *Proeven op beton - Statische elasticiteitsmodulus bij druk*. 1990.
38. **Sensirion.** SHT21 - Digital Humidity Sensor (RH&T).
http://www.sensirion.com/en/01_humidity_sensors/05_humidity_sensor_sht21. [Online]
39. **Janssens, prof.dr.ir-arch. A.** *Bouw fysische aspecten van gebouwen*. 2009.

40. **ASTM.** *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort.*
41. **Compaktuna.** *www.compaktuna.be.* [Online] 2010.
42. **Schutter, Prof.dr.ir. Geert de.** *Diagnose en herstelling van bouwwerken.* 2010.
43. **Betoniek.** <http://www.betoniek.nl/archief/7-047-11-de-treksterkte-van-beton/de-treksterkte-van-beton.79595.lynkx?page=4&favorite=added>. [Online] [Citaat van: 24 Maart 2012.]
44. **standardization, European committee for.** *EN 1992-1-1.* 2004.
45. *Vloerbedekkingen met cementgebonden tegels; deel 1: schadeoorzaken.* **Wagneur, Michel.** : WTCB, 2002.
46. *Vloerbedekkingen met cementgebonden tegels; deel 2: Gedrag volgens de plaatsingswijze.* **Wagneur, Michel.** : WTCB, 2002.