

Onderzoek naar de invloed van historische mortels op het hygrothermisch gedrag van metselwerk

Laura Temmerman

Promotor: prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche
Begeleider: ir. Klaas Calle

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad
van Master of Science in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: prof. dr. ir. Arnold Janssens
Faculteit Ingenieurswetenschappen en
Architectuur Academiejaar 2016-2017



Onderzoek naar de invloed van historische mortels op het hygrothermisch gedrag van metselwerk

Laura Temmerman

Promotor: prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche
Begeleider: ir. Klaas Calle

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad
van Master of Science in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: prof. dr. ir. Arnold Janssens
Faculteit Ingenieurswetenschappen en
Architectuur Academiejaar 2016-2017



TOELATING TOT BRUIKLEEN

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 bepalingen 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 copyright terms have to be respected, in particular with regard to the obligation to state expressly the source when quoting results from this master dissertation.

Laura Temmerman, mei 2017

WOORD VOORAF

Met het schrijven van dit dankwoord beëindig ik, na maanden schrijven en onderzoek, mijn masterproef. Dit had ik nooit kunnen realiseren zonder de vele hulp en steun van enkele personen, die ik graag op deze manier zou willen bedanken.

Vooreerst wil ik mijn promotor prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche bedanken voor de vele hulp, uitleg en informatie. Bedankt voor het geduld en het aansturen waar nodig. Ik heb heel wat bijgeleerd. Ook zou ik ir.-arch. Klaas Calle en Charlotte Coupillie willen bedanken voor het beantwoorden van mijn vele vragen, het helpen oplossen van problemen, zowel in het labo als in Delphin, en voor het begeleiden van deze thesis in het algemeen.

Ik ben ook een woord van dank verschuldigd aan allen die praktische hulp boden. Zonder jullie kennis en inzicht was het praktisch deel van deze thesis nooit gelukt. Bedankt aan Dhr. F. Van Loo voor de steun, praktische hulp en de geboden kansen om het bouwen mee vanuit de praktijk te beleven. Extra dank gaat uit naar het bouwbedrijf Cantillana. Jullie hulp, door het aanreiken van verschillende testmortels, werd enorm gewaardeerd.

Mijn ouders zou ik willen bedanken voor de geboden kansen, hulp en steun tijdens de opleiding. Mijn vader zou ik willen bedanken om altijd bereid te zijn wetenschappelijke fenomenen uit te leggen en te helpen in Excel waar nodig. Mama, bedankt voor de hulp, steun en het beantwoorden van vele diverse vragen tijdens het schrijven van deze thesis.

Graag zou ik Saskia in het bijzonder willen bedanken. Uiteindelijk beleefden wij deze periode tezamen. Bedankt om dit samen met mij aan te willen pakken. Een speciaal woord van dank aan Egeleen en Farylde. Bedankt voor alle samenwerking tijdens de afgelopen jaren en de steun in en buiten het atelier. Door de eeuwige discussies en eerlijke commentaren hielpen we elkaar telkens vooruit. Egeleen, ook jij nogmaals bedankt voor de hulp bij het experimenteel deel van dit onderzoek. Tot slot zou ik graag Kevin bedanken voor zijn eeuwige geduld en steun, zowel op goede momenten als momenten waarop het moeilijk ging.

Laura Temmerman, mei 2017

ONDERZOEK NAAR DE INVLOED VAN HISTORISCHE MORTELS OP HET HYGROTHERMISCH GEDRAG VAN METSELWERK

DOOR LAURA TEMMERMAN

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master of Science in de
ingenieurswetenschappen: architectuur
Academiejaar 2016-2017

Promotor: prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche
Begeleider: ir. Klaas Calle

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: prof. dr. ir. Arnold Janssens

ABSTRACT

In deze scriptie wordt het vochtgedrag van historische mortels en hun invloed op het vochtgedrag van metselwerk bestudeerd. Ondanks dat er al heel wat onderzoek is verricht, blijft het hygrothermisch gedrag van poreuze materialen complexe materie. Hierdoor wordt bij numerieke simulaties veelal uitgegaan van vereenvoudigde en gehomogeniseerde modellen. In dit onderzoek wordt ervoor gekozen deze homogenisering juist niet toe te passen en zo na te gaan wat de invloed van mortelvoegen is op het vochtgedrag in metselwerk.

In een eerste deel van het onderzoek worden verschillende types historische mortels experimenteel onderzocht. Op basis van de bekomen eigenschappen kan het hygrothermisch gedrag van de mortels onderling vergeleken worden. In een tweede deel worden de experimenteel bekomen resultaten geïmplementeerd in het numeriek HAM-simulatieprogramma Delphin. Op die manier wordt een zo realistisch mogelijk model opgesteld en kan, door het simuleren van verschillende combinaties baksteen en mortel, de invloed en interactie van en tussen poreuze materialen bepaald worden. De simulaties tonen de invloed van mortel (in zowel lint- als stootvoegen) aan in het metselwerk. De bekomen resultaten bieden dieper inzicht in het hygrothermisch gedrag van de verschillende mortels en hun interactie met bakstenen en restauratiemortels.

Uit het onderzoek blijkt dat zowel de mortelvoegen, de gebruikte bakstenen als de verhouding van de onderlinge materiaaleigenschappen (porositeit en waterabsorptiecoëfficiënt) van belang zijn voor het hygrothermisch gedrag van het metselwerk. Ook blijkt gehomogeniseerd metselwerk slechts een geschikte benadering wanneer de eigenschappen van beide poreuze materialen gelijkaardig zijn. Wanneer de eigenschappen verschillen vormt de homogenisering een onder- of overschatting.

TREFWOORDEN

Historische mortel, vochtgedrag metselwerk, waterabsorptiecoëfficiënt, capillariteit, porositeit, grensweerstand, Delphin

Hygrothermal performance evaluation of mortar in heritage buildings

Laura Temmerman

Supervisors: prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche, ir.-arch. Klaas Calle

Abstract - In this master dissertation a study regarding the moisture behaviour of mortars, and its influence on the behaviour of brickwork, was conducted. This was done in two parts. In the first, experimental, part the properties of different mortars were determined. In the second, numerical, part the experimental results were implemented in the HAM simulation program Delphin, to study the hygrothermal performance of the different mortars as well as the interaction between bricks and mortars. As an additional topic, the influence of mortars used in restoration work on the historical mortars was studied.

Keywords – historical mortar, moisture behaviour of masonry, water absorption coefficient, capillarity, interface resistance, Delphin.

I. INTRODUCTION

More and more Flemish buildings are being classified as heritage property. This way, they can be protected against decay and demolition. By means of low-energy and sustainable measures, such buildings may contribute to the European climate plan '20-20-20'. However, to protect these classified buildings against loss of heritage value, such low-energy measures are rather restricted. For instance, from a hygrothermal point of view, retrofit of insulation is best applied on the outside of the wall, which is however detrimental for the heritage value of the property. From the point of view of monument care, such retrofit insulation is best done on the inside of historical masonry, but this will lead to moisture stagnation within the wall and to frost damage. To facilitate this, a detailed understanding of the behaviour of moisture in porous materials is required.

Investigation of the hygrothermal behaviour of porous materials is however complex, and therefore simulations are often strongly simplified. Despite the fact that masonry walls are made up of mortar and bricks, they are often considered as an homogeneous brick layer in simulations [1]. Nevertheless, the mortar joints (edge joints as well as butt joints), as well as the boundary layer between brick and mortar, are also important for the hygrothermal properties of masonry.

II. EXPERIMENTAL RESEARCH

Introduction

Based on literature data [2], historical mortars can be divided into several types, based on the aggregates and binders used. Considering the binders, historical mortars used in Flanders are formulated based on lime (hydraulic lime, air hardening lime or pozzolan-lime) or based on cement. Air hardening lime mortars are often so-called bastard mortars, i.e. they also contain cement besides lime.

Based upon the aforementioned classification, a number of mortars were chosen to investigate. Air hardening lime (bastard-type) and cement mortar from the Belgian supplier Cantillana NV, and a hydraulic lime mortar from Remmers

BVBA were used. All mortars were prepared, cured and dried as described in the Standard NBN EN 1015-11 [3].

For each type of lime mortar a combination was also made with cement mortar, by adding 2 cm of cement mortar on one side of the dried lime mortar test specimen, to simulate restoring historical masonry with cement mortar.

The composition of the mortars that were investigated is shown in Figure 1 (% composition).

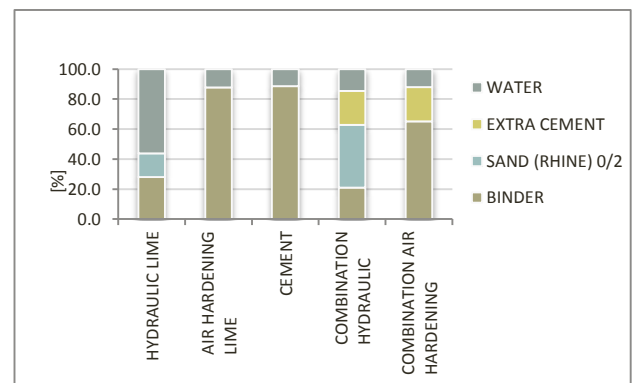


Figure 1| Percentage composition of the test mortars

Capillary absorption test

The test pieces were exposed (via their fracture side) to water with a constant depth of 10 mm. This was achieved by using a water bath with a circulation system to ensure continuous replenishment of the water and constant water depth. A lid on the water bath was used to avoid drying out of the samples by moisture diffusion towards the air.

The weight increase of the test mortars was measured at regular time intervals. Because the suggested measurement time schedule in the Standard NBN EN 1015-18 [4] is not specified to great detail, an alternative schedule was used, in which the weight of the test pieces was determined after 10, 30, 60 and 90 minutes exposure to the water, and subsequently every 24 hours for the next 10 days.

The absorption curve is determined by plotting the weight increase of the mortar test samples [kg/m^2] as a function of time [$\sqrt{t}$]. Figure 2 shows the absorption curves for the test pieces based on hydraulic lime mortar.

The resulting absorption curves can be used to determine the water absorption coefficient A_w of the test material. This can be done using the initial linear part of the absorption curves, or by means of a mathematical formula given in the Standard [4]. The capillary moisture content w_c of the test samples can be determined from the inflection point of the curves. This point is the moisture level at which the capillary water absorption of the material changes from the initial linear phase into a second, slower phase. By calculating also the porosity of the materials, the overall hygrothermal behaviour of the different mortars can be determined, and can be compared between test samples [5].

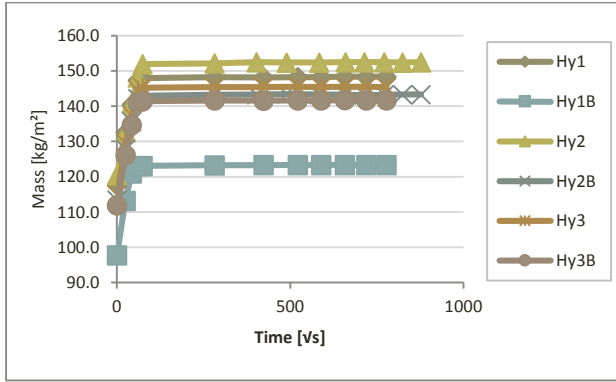


Figure 2| Capillary absorption curves for hydraulic lime mortars

The obtained results (water absorption coefficient from the absorption curves, capillary moisture content and porosity) are given in Table 1.

Table 1| Overview of the hygrothermal properties of the mortars investigated

MATERIAL DATA					
MORTARS	A_w [kg/m²s ^{0.5}]	w_c [kg/m²]	f_{cap} [kg/kg]	f_{eff} [kg/kg]	f [kg/kg]
HYDRAULIC LIME	0.518	142.0	0.180	0.209	0.386
AIR HARDENING LIME	0.043	155.8	0.022	0.074	0.147
CEMENT	0.045	128.8	0.028	0.081	0.133
COMBINED MORTARS	A_w [kg/m²s ^{0.5}]	w_c [kg/m²]	f_{cap} [kg/kg]	f_{eff} [kg/kg]	f [kg/kg]
HYDRAULIC LIME	0.320	170.1	0.124	0.186	0.359
AIR HARDENING LIME	0.131	170.0	0.032	0.092	0.181

III. NUMERICAL RESEARCH

By implementing the experimental results into Delphin, a more representative model for the mortars studied can be devised. In this numerical research project, three types of constructions were simulated. The final model was improved using the specific insights obtained from each of these.

Reference model

In the first part of this research, a capillary absorption test was simulated. For this, simple mortar test pieces and mortar joints were simulated in 1D. Figure 3 shows the set-up used for this. The left side of each test piece is in contact with a water surface with a depth of 10 mm, whilst the other sides border on a typical inner environment (i.e. laboratory conditions).

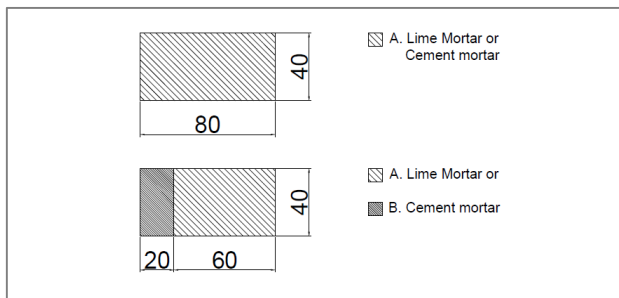


Figure 3-a| Set-up reference model mortar test specimen [mm]

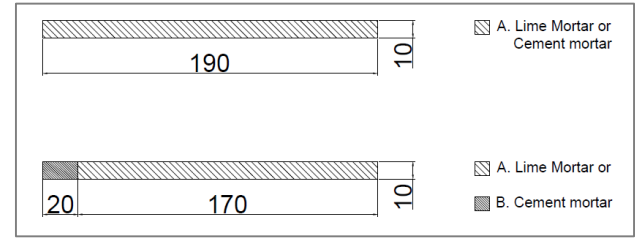


Figure 3-b| Set-up reference model mortar joint [mm]

From these simulations, the properties of the mortars can be compared versus each other as well as with the measurement results. A first comparison is also possible with the situation in which lime mortars are being restored with cement mortar.

Compiled model

In the second part, several composites consisting of two identical bricks joined together with mortar were simulated in 2D. In total, four different mortars and three different types of bricks (i.e. bricks of similar, lower and higher water absorption coefficients as that of the mortar investigated) were simulated. The purpose of these simulations is to investigate the influence of the interface resistance between mortar and brick. When restoring historical mortar with cement mortar, the interface resistance between both mortars is assumed to be identical to that between brick and mortar. The interface resistance is varied between 0 m/s, $1 \cdot 10^{10}$ m/s, $3 \cdot 10^{10}$ m/s and $5 \cdot 10^{10}$ m/s. This study is based on research done by Derluyn et al. [6] and will be used when simulating the realistic model in the third part of this numerical research study.

Massive wall model

In the third and last part, a realistic massive wall was simulated. Figure 4 shows the set-ups used for this: one for the normal situation, and one in which the mortar joints are being restored with cement mortar. The final simulations were improved based on the results obtained with the model simulations described in the first parts of this study. The models were exposed to real climate data and were simulated over a period of one year. On top of this, homogeneous brick walls were also simulated. These had the same dimensions and were exposed to the same conditions. The influence of the mortar joints (edge joints as well as butt joints) can then be determined by comparing the results of both simulations.

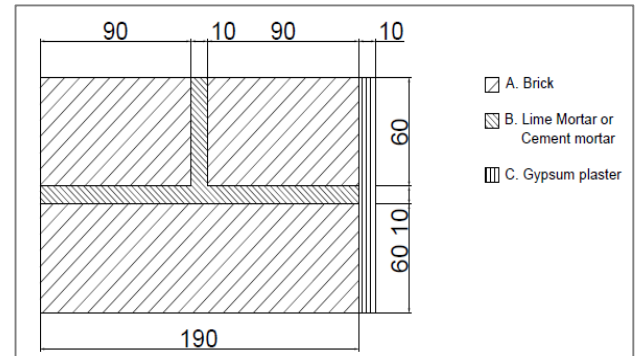


Figure 4-a| Set-up simulation study on massive wall/masonry

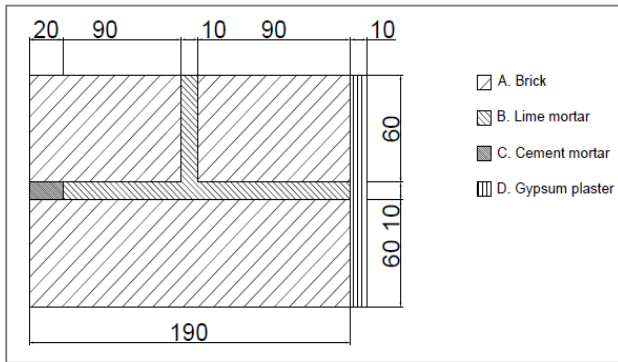


Figure 4-b| Set-up simulation study on restored massive wall

The mould index can be used to estimate the risk for mould growth and thus the quality of the different set-ups. This is calculated in Delphin using the Viitanen Mould Model. The higher its value, the higher the risk for mould growth is. At the inside surface of the masonry a gypsum plaster is added, for which this mould index was calculated in the middle of the upper brick, in the middle of the lower brick, and at the mortar joint.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

The first series of simulations (reference model) gave similar results for the relative hygrothermal behaviour of the different mortars as those obtained in the experimental work. These results showed that hydraulic lime mortar absorbs more moisture and at a higher rate than air hardened lime mortar and cement mortar, again in line with the results of the experimental work. Historical lime mortar was found to be most porous. Since the results obtained in this simulation were similar to those of the experimental work, it was assumed for further work that the materials used and their properties were accurately depicted in the models.

From the second series of simulations (compiled model) the presence of the interface resistance between mortar and brick, rather than its magnitude, proved to be important for the hygrothermal behaviour of the masonry. Since values of $3 \cdot 10^{10}$ m/s and $5 \cdot 10^{10}$ m/s yielded similar results (little to no difference) and since literature data [6] demonstrate that the real interface resistance is typically between $2.5 \cdot 10^{10}$ m/s and $5 \cdot 10^{10}$ m/s, a value of $3 \cdot 10^{10}$ m/s was considered to be most representative for the remainder of this work.

The results of the third series of simulations show the importance of the type of brick (studied for bricks with water absorption coefficients lower, higher or similar to that of the mortar). Figure 5 shows the results for a massive wall composed of hydraulic lime mortar and bricks of lower water absorption coefficient. These reveal that the mortar draws moisture deep into the masonry. Figure 6 shows the results for a massive wall composed of hydraulic lime mortar and bricks of higher water absorption coefficient. These demonstrate that the brick draws moisture from the mortar joints. When the water absorption coefficients of mortar and bricks are comparable, they only have a minimal influence on each other regarding moisture management.

When the water absorption coefficients of the bricks and the mortar used are similar, the mould index of massive masonry walls and that of a corresponding homogeneous brick wall are comparable. When the mortar is more porous than the bricks, an homogeneous brick wall model results in an underestimation of the mould index. When the bricks are more porous than the

mortar joints, an homogeneous brick wall model is a small overestimation of the mould index.

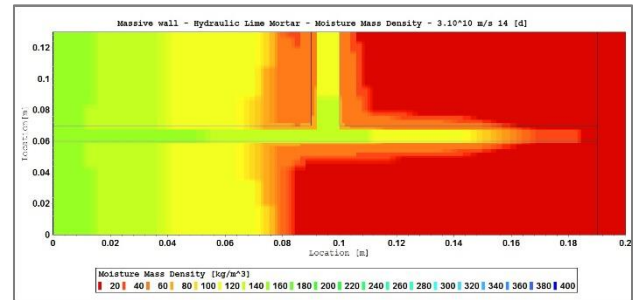


Figure 5| Massive wall - Hydraulic lime mortar and bricks of lower water absorption coefficient - Moisture content after 14 days

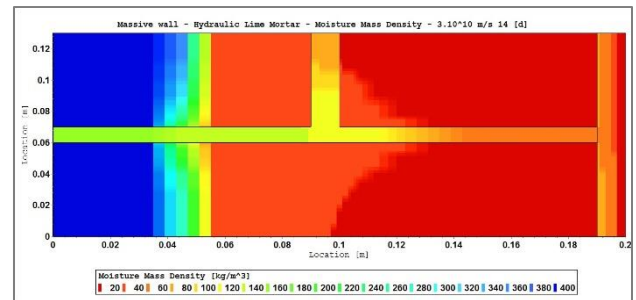


Figure 6| Massive wall - Hydraulic lime mortar and bricks of higher water absorption coefficient - Moisture content after 14 days

From the point of view of mould growth, restoration work is best done with a compatible mortar that is more porous than the bricks present.

From this third series of simulations, the influence of the cement mortars used in restoration work on historical mortars was found to be small. This may be caused by the interface resistance between the cement mortar used and the historical lime mortar present, and needs to be further investigated.

IV. CONCLUSIONS

This research shows that the mortar joints, the bricks used as well as their relative porosity (more specifically: their water absorption coefficients) are important for the hygrothermal behaviour of historical masonry.

In general, it can be concluded that the more porous material in the masonry will draw moisture from the lesser porous material. If the water absorption coefficients of both materials are comparable, they will have minimal influence on each other regarding moisture management in the masonry. The butt joints also have an important influence on this, as they determine the moisture content of the inner bricks and as such also the potential mould growth near these.

Further research could include to study the interface resistance between cement mortars and lime mortars. This would allow us to develop a better model to simulate the hygrothermal behaviour of different mortars in restoration work.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to acknowledge the support of her supervisors prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche and ir.-arch. Klaas Calle.

REFERENCES

- [1] E. Vereecken and S. Roels, "Hygric performance of a massive masonry wall: How do the mortar joints influence the moisture flux?," *Elsevier: Construction and Building Materials*, vol. 41, pp. 697-707, 2012.
 - [2] Monumentenwacht Vlaanderen, "Onderhoud en herstel van voegen in historisch metselwerk," Drukkerij Leën, Hasselt, 2013.
 - [3] "NBN EN 1015-11: Proeven voor metselmortel - Deel 11: Bepalen van de buigsterkte en druksterkte van verharde mortel," NBN, 1999.
 - [4] "NBN EN 1015-18: Proeven voor metselmortel - Deel 18: Bepaling van de capillaire waterabsorptie van verharde pleistermortels," NBN, 2003.
 - [5] C. Hall en W. D. Hoff, *Water transport in brick, stone and concrete*, London: Spon Press, 2002.
 - [6] H. Derluyn, H. Janssen and J. Carmeliet, "Influence of the nature of interfaces on the capillary transport in layered materials," *Elsevier: Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 3685-3693, 2010.
-

INHOUDSOPGAVE

HOOFDSTUK 1: INLEIDING	18
HOOFDSTUK 2: LITERATUURSTUDIE	20
PARAGRAAF 1: MORTELS	21
1.1 TYPES MORTEL OP BASIS VAN TOEPASSING	22
1.1.1 METSELEN	22
1.1.2 HERSTELLEN	24
1.1.3 RESTAUREREN	24
1.1.4 ANDERE TOEPASSINGEN	26
1.2 TYPES MORTEL OP BASIS VAN SAMENSTELLING	27
1.2.1 KALKMORTEL	27
1.2.2 CEMENTMORTEL	27
1.2.3 BASTAARDMORTEL	28
1.2.4 OVERZICHT	28
1.3 TIJDSLIJN MORTELS	28
1.3.1 EVOLUTIE VAN HET MORTELTYPE	28
1.3.2 METSELPRAKTIJK VANDAAG EN IN DE TOEKOMST	29
1.4 CHEMISCHE ACHTERGROND	30
1.4.1 CHEMISCHE PROCESSEN IN DE MORTEL	30
1.4.2 SAMENSTELLING VAN DE MORTEL	33
1.5 ONDERHOUD EN HERSTELLINGEN	34
1.5.1 SCHADEFENOMENEN EN OORZAKEN	34
1.5.2 HERSTELLINGEN	37
1.5.3 ONDERHOUD	39
PARAGRAAF 2: BOUWFYSICA	41
2.1 WARMTE-TRANSPORT IN GEBOUWEN	42
2.1.1 VORMEN VAN WARMTE-OVERDRACHT IN GEBOUWEN	42
2.1.2 GELEIDING - CONDUCTIE	42
2.1.2 CONVECTIE	44
2.1.3 STRALING	45
2.2 VOCHTTRANSPORT IN GEBOUWEN	45
2.2.1 VORMEN VAN VOCHTTRANSPORT IN GEBOUWEN	46
2.2.2 DIFFUSIE VAN WATERDAMP	46
2.2.3 CAPILLAIRE OPZUIGING VAN WATER	51
2.2.4 DROGING VAN POREUZE MATERIALEN	54
2.2.5 LINK NAAR VERDER ONDERZOEK	55
2.3 GEKOPPELD WARMTE- EN VOCHTTRANSPORT	55
2.3.1 WARMTEOPSLAG	55
2.3.2 VOCHTOPSLAG	56

 HOOFDSTUK 3: VOORHANDE TESTMETHODES	57
 PARAGRAAF 1: LABO TESTEN	58
1.1 CUP TEST	59
1.1.1 DRY CUP – WET CUP	59
1.1.2 DRY CUP TER BEPALING VAN HET DIFFUSIEWEERSTANDSGETAL EN DE EQUIVALENTE DIFFUSIEDIKTE	59
1.1.3 WET CUP TER BEPALING VAN HET DIFFUSIEWEERSTANDSGETAL EN DE EQUIVALENTE DIFFUSIEDIKTE	59
1.2 CAPILLAIRE ABSORPTIEPROEF	60
1.2.1 TER BEPALING VAN DE WATERABSORPTIECOËFFICIËNT	60
1.2.2 TER BEPALING VAN HET CAPILLAIR VOCHTGEHALTE	60
1.3 KLIMAATKAST	60
1.3.1 TER BEPALING VAN HET HYGROSCOPISCH EVENWICHT	60
1.3.2 TER BEPALING VAN DE HYGROSCOPISCHE UITZETTING	61
1.4 X-RAY	61
1.4.1 TER BEPALING VAN HET VOCHTGEHALTE EN VOCHTVERDELING	61
1.4.2 TER BEPALING VAN DE CHEMISCHE SAMENSTELLING	61
1.5 HOT-BOX TEST	62
1.5.1 TER BEPALING VAN DE WARMTEWEERSTAND	62
 PARAGRAAF 2: IN-SITU TESTEN	63
2.1 KARSTEN PROEF	64
2.1.1 TER BEPALING VAN DE WATERABSORPTIECOËFFICIËNT	64
2.2 SONDES	64
1.2.1 TER BEPALING VAN DE WARMTEWEERSTAND	64
1.2.2 TER BEPALING VAN HET VOCHTGEHALTE EN VOCHTVERDELING	64
 HOOFDSTUK 4: HAM-SIMULATIES	65
 PARAGRAAF 1: HAM-SIMULATIES	66
1.1 ACHTERGROND	67
1.2 HAM-SIMULATIEPROGRAMMA'S	67
1.2.1 WUFI	67
1.2.2 DELPHIN	68
1.3 SIMULATIEPROGRAMMA DELPHIN	68
1.3.1 NUMERIEKE SIMULATIE	68
1.3.2 ONZEKERHEDEN	70
1.3.3 INTERFACE	71
 PARAGRAAF 2: UITVOERING IN DELPHIN	72
2.1 AANPAK	73
2.2 INTERFACE MORTEL-BAKSTEEN	73
 HOOFDSTUK 5: ONDERZOEKSVRAAG	75

 HOOFDSTUK 6: EXPERIMENTEEL ONDERZOEK	77
 PARAGRAAF 1: INLEIDING	78
1.1 DOEL EN AANPAK	79
1.2 VOORBEREIDING	79
1.2.1 MORTELKEUZE	79
1.2.2 PROEFSTUKKEN	79
 PARAGRAAF 2: CAPILLAIRE ABSORPTIEPROEF	81
2.1 PROEFOPSTELLING EN UITVOERING	82
2.1.1 PROEFOPSTELLING	82
2.1.2 UITVOERING	82
2.2 RESULTATEN EN CONCLUSIES	83
2.2.1 RESULTATEN	83
2.2.2 CONCLUSIES	88
 PARAGRAAF 3: POROSITEIT	90
3.1 CAPILLAIRE POROSITEIT	91
3.2 EFFECTIEVE POROSITEIT	91
3.3 OPEN POROSITEIT	91
3.4 OVERZICHT	91
 HOOFDSTUK 7: ONDERZOEK IN DELPHIN	93
 PARAGRAAF 1: UITVOERING IN DELPHIN	94
1.1 DOEL EN AANPAK	95
1.2 MATERIAAL DATA	95
 PARAGRAAF 2: REFERENTIE MODELLEN	96
2.1 OPSTELLING	97
2.2 VOORWAARDEN EN OUTPUTS	98
2.2.1 OUTPUTS	98
2.2.2 VOORWAARDEN	98
2.3 SIMULATIES	98
2.3.1 TEMPERATUUR PROEFSTUKKEN	98
2.3.2 VOCHTGEHALTE PROEFSTUKKEN	99
2.3.3 VERKEERD RESTAUREREN	100
2.3.4 GRENSWEERSTAND COMBINATIES	101
2.4 CONCLUSIES	102
 PARAGRAAF 3: COMPOSITIE MODELLEN	103
3.1 OPSTELLING	104
3.2 VOORWAARDEN EN OUTPUTS	105
3.2.1 OUTPUTS	105
3.2.2 VOORWAARDEN	106
3.3 SIMULATIES	106
3.3.1 GRENSWEERSTAND BAKSTEEN-MORTELS	106
3.4 CONCLUSIES	108

 PARAGRAAF 4: MASSIEVE MUUR MODELLEN	109
4.1 OPSTELLING.....	110
4.1.1 MORTEL	110
4.1.2 BAKSTEEN	111
4.2 VOORWAARDEN EN OUTPUTS	112
4.2.1 OUTPUTS	112
4.2.2 VOORWAARDEN	112
4.3 SIMULATIES.....	112
4.3.1 VOCHTGEHALTE MASSIEVE MUUR	112
4.3.2 INTERACTIE BAKSTEEN - MORTEL.....	115
4.3.3 VERKEERD RESTAUREREN	120
4.4 CONCLUSIES	121
 HOOFDSTUK 8: CONCLUSIES.....	123
 HOOFDSTUK 9: BIBLIOGRAFIE	126
 HOOFDSTUK 10: BIJLAGES.....	130
BIJLAGE A: VOORBEREIDING EXPERIMENT	131
BIJLAGE B: CAPILLAIRE ABSORPTIEPROEF	134
BIJLAGE C: MATERIAALDATA	159
BIJLAGE D: MASSABALANSEN DELPHIN	164
BIJLAGE E: RESULTATEN DELPHIN	170

NOMENCLATUUR

A_w	waterabsorptiecoëfficiënt	$\text{kg/m}^2\text{s}^{0.5}$
A_s	oppervlakte	mm^2
c	soortelijke warmtecapaciteit	J/kgK
c	concentratie	kg/m^3
d	dikte	m
d	diameter	m
e	emissiviteit	-
f	porositeit	kg/kg
f	temperatuurcorrectiefactor	-
g	massastroomdichtheid	$\text{kg/m}^2\text{s}$
G	massadebiet	kg/s
h	enthalpie	J/kg
j	massaflux	$\text{kg/m}^2\text{s}$
m	massa	kg
m	massa per contactoppervlak	kg/m^2
p	druk	Pa
$p \cdot \zeta$	volumieke soortelijke vochtcapaciteit	kg/m^3
q	warmtestroomdichtheid of warmteflux	W/m^2
Q	warmte	J
r	straling	m
R	universele gasconstante	JK/mol
R_v	gasconstante waterdamp	J/kgK
R	warmte weerstand	$\text{m}^2\text{K/W}$
t	tijd	s
T	temperatuur	K
U	inwendige energie v	J
v	stromingssnelheid	K/m
V	volume	m^3
w	vochtgehalte	kg/m^3
W	arbeid	J
x	waterdampverhouding	kg/kg
Z	diffusieweerstand	m/s

Griekse symbolen

α	warmte-overgangscoefficiënt	$\text{W/m}^2\text{K}$
γ	contacthoek	$^\circ$
δ	permeabiliteit	-
η	viscositeit	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
θ	temperatuur	K of $^\circ\text{C}$
θ	contacthoek	-
λ	warmtegeleidingscoëfficiënt	W/mK
μ	diffusieweerstandsgetal	-
ρ	densiteit massadichtheid	kg/m^3
σ	spanning	N/m^2
σ	bron of afvoer	$\text{kg/m}^3\text{s}$
σ	Standaardafwijking	-
φ	relatieve vochtigheid	-
Φ	warmtestroom	W
Ψ	arbeidsstroom	W

Afkortingen

BES	Building Envelope System
C	cementmortel
CHAMPS	Coupled Heat Air Moisture and Pollutant Simulation
HAM	Heat Air Moisture
Hi	historische kalkmortel
HiC	met cement gerestaureerde historische kalkmortel
Hy	hydraulische kalkmortel
HyC	met cement gerestaureerde hydraulische kalkmortel
Lu	luchtkalkmortel
LuC	met cement gerestaureerde luchtkalkmortel
REV	Representative Elementary Volume
VOC	Volatile Organic Compound
WDR	Wind Driven Rain

Subscripts

a	lucht
c	capillair
c	convectie
c	koud
cap	capillair
conv	convectief
cr	kritisch
d	droog/ uit droogoven
d	dauw
diff	diffusief
e	exterieur
eff	effectief
f	fluidum
grad	gradiënt
i	interieur
in	aangevoerd
h	warm
r	straling
ref	referentie
sat	verzadigings-
se	buitenoppervlak
si	binnenoppervlak
uit	afgevoerd
v	waterdamp
w	(capillair) water

|HOOFDSTUK 1: INLEIDING

"De inventaris van bouwkundig erfgoed bevat op dit moment ruim 80.000 relictten bouwkundig erfgoed." [1]

Meer en meer Vlaamse gebouwen en constructies worden als historisch erfgoed erkend. Op die manier probeert men waardevolle gebouwen te beschermen tegen verval, afbraak of sloop. Ook zij kunnen een meerwaarde bieden binnen het Europees klimaatplan '20-20-20' waarin men de uitstoot van broeikasgassen terugschroeft en zo de opwarming van de aarde wil inperken.

Door middel van energiezuinigheid en verhoogde duurzaamheid in gebouwen, ook in bouwkundig erfgoed, kan men de energieprestaties van het Vlaams erfgoed verbeteren. Vanuit de Vlaamse overheid werden reeds initiatieven genomen inzake energiezuinigheid in dit erfgoed. Om de beschermde gebouwen echter te vrijwaren van verlies van erfgoedwaarde zijn de energiezuinige ingrepen beperkt. Deze beperkingen leiden echter tot nadelige hygrothermische gevolgen. Zo gebeurt het na-isoleren van een historische wand, hygrothermisch gezien, best aan de buitenzijde, hetgeen het uitzicht wijzigt en de erfgoedwaarde vermindert. Wanneer rekening wordt gehouden met de erfgoedwaarde van het gebouw, en het na-isoleren aan de binnenzijde gebeurt, zal vocht stagneren in de muur en leidt dit tot vorstschade. Een goed evenwicht dient dus gevonden te worden. [1] [2] [3] [4]

In deze context is het van belang mogelijke hygrische en thermische risico's te kunnen inschatten, en een goed begrip te hebben van het hygrothermische gedrag van verschillende bouwconstructies. Met behulp van specifieke software kan dit gedrag voorspeld worden, alsook eventuele vorstschade, opstijgend vocht en regendoorslag. [5] Dit blijkt echter complexe materie te zijn. Als een gevolg van die complexiteit worden simulaties veelal vereenvoudigd. Zo wordt (historisch) metselwerk, ondanks het feit dat deze is opgebouwd uit mortel en baksteen, veelal homogeen beschouwd. Op die manier wordt de invloed van mortel, op het hygrothermisch gedrag van het metselwerk, niet in beschouwing genomen. Nochtans zijn mortels ook van groot belang in het gedrag van metselwerk. De voegen hebben een invloed op zowel de horizontale als verticale vocht- en warmtetransporten doorheen de gevel. Ook is de grenslaag tussen de mortel en bakstenen van belang. Deze grenslaag, en meer in het bijzonder, de weerstand ervan, bepaalt de vochtuitwisseling tussen de mortel en bakstenen.

Om deze redenen heeft deze masterproef als doel om dieper in te gaan op historische mortels en hun invloed op het vochtgedrag van metselwerk. Op die manier zal worden getracht een beter inzicht te krijgen in hun samenstelling, eigenschappen, onderlinge verschillen en hygrothermisch gedrag. Hierbij zal ook de interactie met baksteen en met hedendaagse mortels bekeken worden. Voor dit onderzoek zal gebruik gemaakt worden van experimenteel onderzoek en numerieke simulaties in het HAM-simulatieprogramma Delphin.

Gelijktijdig loopt een onderzoek naar het vochtgedrag van historische bakstenen: "*Studie naar het hygrothermisch gedrag van historische bakstenen na hydrofobering a.d.h.v. experimenten en simulaties in Delphin*". Aan de hand van dit onderzoek, door Saskia De Mol, hopen Saskia en ikzelf meer inzicht te verwerven in het vochtgedrag van de materialen afzonderlijk.

Om onderzoek te kunnen voeren naar het hygrothermisch gedrag en de invloed van mortel, is een diepere kennis nodig over mortels en de aanwezige reacties in het metselwerk. Dit wordt bestudeerd in *Hoofdstuk 2*. In een eerste deel wordt de historie, toepassing en samenstelling van mortel besproken. Ook wordt kort ingegaan op de aanwezige chemische reacties en mogelijke herstellingstechnieken. In een tweede deel wordt dieper ingegaan op de verschillende hygrothermische reacties in de gevel.

In *Hoofdstuk 3* worden de voorhanden testmethodes toegelicht. Hieruit wordt de capillaire absorptieproef gekozen bij wijze van experiment. De aanpak, resultaten en verwerking ervan wordt besproken in *Hoofdstuk 6*. De werking en verschillende parameters van het simulatieprogramma Delphin worden toegelicht in *Hoofdstuk 4*. De eigenlijke uitvoering, resultaten en conclusies worden besproken in *Hoofdstuk 7*. Tot besluit worden de gevonden resultaten uit het experiment en de simulaties vergeleken en samengevat in *Hoofdstuk 8*.

|HOOFDSTUK 2: LITERATUURSTUDIE

PARAGRAAF 1 | MORTELS

PARAGRAAF 2 | BOUWFYSICA

In deze literatuurstudie worden zowel mortels als hun hygrothermisch gedrag bestudeerd. In een eerste paragraaf wordt de toepassing, historie en samenstelling van mortel besproken. Ook herstellingstechnieken en verschillende chemische processen bij het uitharden en hydrateren van mortel worden besproken. In een tweede paragraaf wordt dieper ingegaan op de verschillende vormen van warmte- en vochttransport in poreuze materialen.

PARAGRAAF 1: MORTELS

- 1 | TYPES MORTEL OP BASIS VAN TOEPASSING
- 2 | TYPES MORTEL OP BASIS VAN SAMENSTELLING
- 3 | TIJDSLIJN MORTELS
- 4 | CHEMISCHE ACHTERGROND
- 5 | ONDERHOUD EN HERSTELLINGEN

Net als de opbouw van metselwerk in het algemeen, is mortel op zich ook enorm geëvolueerd. Zowel de samenstelling als toepassing wijzigde over de jaren heen. Daarnaast is, sinds het eind van de 19^{de} eeuw, een nieuwe kennis ontwikkeld omtrent het gedrag, de verschillende processen bij het aanmaken en het herstellen van mortel.

1.1| TYPES MORTEL OP BASIS VAN TOEPASSING

1.1.1| METSELEN

Het metselen van gevelstenen gebeurt met een metselmortel, of legmortel. De voegen worden afgewerkt, of gevoegd, met een voegmortel. Dit metselen en voegen kan in één beweging (vol en zat metselen) of apart gebeuren. Wanneer het metselen en voegen niet afzonderlijk gebeurt, kan, maar moet niet, gewerkt worden met eenzelfde mortel.

| LEGMORTEL

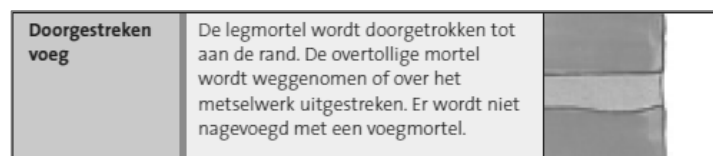
Historisch gemetst gevelwerk verschilt op meerdere vlakken van hedendaags metselwerk. De verschillen uiten zich eerst en vooral in steenkeuze en mortelkeuze. Daarnaast verschilt ook de toepassing van de mortelspecie.

In de hedendaagse metselpraktijk wordt er een onderscheid gemaakt tussen leg- en voegmortels. Zo worden de gevelstenen gemetst via een legmortel en worden ze na gemetst met een voegmortel. Bij historisch metselwerk daar en tegen wordt er enkel gebruik gemaakt van een legmortel. Deze werd rijkelijk aangebracht zodat de mortel zowel als legmortel als voegmortel werd gebruikt. Het type voeg verschilt naargelang de bouwperiode.

| Vol en zat metselen

Sinds de middeleeuwen werd afgestapt van de originele bouwtechnieken op basis van natuurlijke bindmiddelen, en werd de gevel als massief metselwerk opgebouwd (zie Hoofdstuk 2, paragraaf 1.3). De stenen werden met een doorgestreken legmortel vol en zat gemetseld.

Onder 'vol en zat' metselen wordt begrepen dat men een volledig mortelbed uitspreidt waarin de gevelsteen wordt geplaatst. Deze wordt dan in één keer dicht gestoten. Op die manier komt de overtollige mortel vrij en wordt deze afgestroken met het truweel. Omdat in deze techniek de gevelstenen tegelijkertijd worden gemetseld en opgevoegd wordt er gesproken van 'doorstrijken van de voeg' of ook wel 'opvoegen achter de hand'. Deze techniek resulteert in een volledige voegvulling en vergt een vrij vloeibare mortel en een iets grotere hoeveelheid aan mortelspecie dan bij de hedendaagse technieken waarbij achteraf wordt opgevoegd. Figuur 2.1 [6] verduidelijkt deze techniek. [7] [8] [9]



Figuur 2.1| Doorgestreken voeg [6]

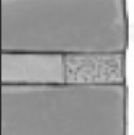
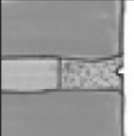
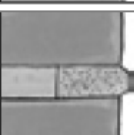
| VOEGMORTEL

In de latere middeleeuwen werd de voegmortel geïntroduceerd. De techniek ontstond om, door middel van een platvolle of een voeg met dagstreep, het metselwerk regelmatig te doen lijken. Pas vanaf de 18^{de} eeuw werd het gebruik van een voegmortel courant gebruikt.

| Tijdslijn voegtypes

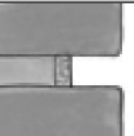
Waar voordien enkel met legmortels werd gemetseld, werd vanaf de 18^{de} eeuw langzaamaan gebruik gemaakt van een aparte voegmortel. Hiervoor werd de doorgestreken mortel enkele centimeters weggehaald om daarna opnieuw op te voegen met een aparte mortelspecie. Deze techniek resulteerde in een platvolle voeg en vond zijn doorbraak in de 19^{de} eeuw, op het moment dat portlandcement zijn opgang vond. Deze techniek wordt nu ook gebruikt tijdens restauratiewerken om geschonden of verweerde legmortel te herstellen.

In de 18^{de} eeuw werden ook enkele technieken ontwikkeld om het metselwerk strakker en regelmatiger te doen lijken. Zo werden de voegmortels vanaf de 18^{de} eeuw geknipt, gesneden en gekleurd. Ook voegen met een dagstreep resulteerde in regelmatig metselwerk. Figuur 2.2 [6] illustreert deze verschillende voegtypes. De manier van voegen hangt nauw samen met de algemeen aanvaarde bouwstijl van die tijd.

Platvolle voeg	De voegmortel wordt glad afgestroken.	
Voeg met dagstreep	Bij onregelmatige of brede voegen werd een dagstreep getrokken om het metselwerk regelmatig te laten lijken.	
Geknipte voeg	De uitpuilende voeg wordt boven- en onderaan schuin of recht afgesneden. De voeg wordt benadrukt.	
Gesneden voeg	Vergelijkbaar met de knipvoeg, maar dan gelegen in het gevelvlak.	

Figuur 2.2| Voegtypes 18de eeuw [6]

Later, in de 20^{ste} eeuw, werden schaduwvoegen en verdiepte voegen geïntroduceerd. Deze manier van voegen resulteert in een verminderde blootstelling aan regen en, bijgevolg, een hogere duurzaamheid. Door hun hoge arbeidsintensiviteit wordt deze techniek nog slechts uitzonderlijk gebruikt. Figuur 2.3 [6] illustreert hoe deze verschillende voegtypes.

Verdiepte voeg	De legmortel wordt na het metselen diep uitgekrabd en al dan niet nagevoegd.	
Schaduwvoeg	De voegmortel wordt in deelintvoegen schuin afgestroken. Het water kan zo vlot aflopen en het horizontale karakter wordt benadrukt.	

Figuur 2.3| Nieuwe voegtypes 20ste eeuw [6]

| VERSCHILLEN

| Mortels

Wanneer gebruik wordt gemaakt van verschillende leg- en voegmortels, kunnen de eigenschappen van de voegmortel aangepast worden zodat deze de achterliggende legmortel kan beschermen tegen mechanische (zettingen en schokken), fysische (slagregen, temperatuurschommelingen en vorst-dooicycli) en chemische (agressieve agentia in de lucht of water) werkingen waaraan het metselwerk wordt blootgesteld.

Afhankelijk van de functie dat het voegwerk dient te vervullen, dient het een specifieke bestandheid te hebben tegen deze werkingen. Die bestandheid bepaalt de duurzaamheid van het oppervlak. De vereiste bestandheid en benodigde sterkte bepalen de samenstelling van de voegmortels en blootstellingsklasse waaraan de mortel zou moeten kunnen weerstaan. Naast de rol voor de duurzaamheid spelen de voegvulling, -type en -kleur ook een belangrijke rol bij het uitzicht van de gevel. De samenstelling van de legmortel wordt bepaald aan de hand van de vereiste sterkte van de muur. De samenstelling van de voegmortel is afhankelijk van meerdere factoren. Hierbij spelen het gewenste uitzicht, duurzaamheid en noodzakelijke specifieke bestandheid een rol.

Daarnaast worden de karakteristieken van de voeg ook bepaald door de wijze van verdichting en de verhardingsvoorwaarden van de mortel. Zo dient de mortel tijdens het opvoegen goed aangedrukt te worden om een compacte voeg te verkrijgen en dient er genoeg water aanwezig te zijn om een normaal verhardingsproces te garanderen. [9]

Daar waar bij het 'opvoegen achter de hand' de gevelstenen tegelijkertijd worden gemetseld en gevoegd, is het 'navoegen' iets arbeidsintensiever door het deels wegkrabben van de legmortel, en vergt deze techniek een gespecialiseerde aannemer. Het scheiden van metselen en voegen heeft echter vaak een verzorgder resultaat als gevolg. Dit omdat de voegmortel kan worden aangepast aan specifieke eisen. Zo kan men zowel de voegkleur en textuur aanpassen als de hardheid van de voeg. Daarnaast dekt het opvoegwerk de lekken af in het metselwerk waardoor de lucht- en regendichtheid verbetert ten opzichte van de volledig gevulde metselvoegen.

Beide technieken worden vandaag de dag nog steeds gebruikt en hangen af van de techniekvoorkeur van de aannemer of de wensen van de opdrachtgever. [7] [9]

1.1.2| HERSTELLEN

Historisch en hedendaags metselwerk worden blootgesteld aan verschillende mechanische, fysische en chemische werkingen. [9] Wanneer de gevelstenen of mortels niet bestand genoeg zijn tegen deze werkingen lopen ze schade op. Deze kunnen op verscheidene manieren hersteld worden. Het hervoegen van het metselwerk met een herstelmortel is een van de mogelijke oplossingen.

Het begrijpen van deze schadenomenen is van belang om het gedrag van mortels beter te kunnen begrijpen en om een juiste renovatiestrategie te kunnen kiezen. Het is van cruciaal belang dat bij herstellingen van metselwerk de juiste herstellingsmortel wordt bepaald, er rekening wordt gehouden met het gebruikte voegtype en dat een juiste, gedetailleerde, praktijk wordt toegepast. Alleen op die manier is het herstellen van metselwerk zinvol.

| KEUZE VAN DE HERSTELMORTEL

Ten gevolge van de porositeit van de bouwmaterialen is er capillaire werking in het metselwerk. Het water stroomt doorheen de poriën van poreuze materialen. Tijdens die verplaatsing worden oplosbare stoffen (zouten) mee verplaatst doorheen het metselwerk. Dit kan een probleem vormen wanneer waterdichte barrières gevormd worden aan het oppervlak. Op die manier stagneert het water, met de opgeloste zouten, achter deze barrière. Wanneer dit water verdampt zetten de zouten zich af. Door hun hygroscopische eigenschappen kristalliseren ze, waarbij uitzetting gepaard gaat, of trekken ze alle vocht uit de lucht en kan het metselwerk niet voldoende uitdrogen. In beide gevallen leidt dit tot scheuren in het metselwerk.

Zo een waterdichte barrière kan gevormd worden wanneer er een te groot verschil is tussen de leg- en voegmortel. Dit is bijvoorbeeld het geval wanneer een kalkgebonden mortel hervoegd wordt met een hardere mortel. Deze vormt een waterdicht scherm zal uiteindelijk na enige termijn leiden tot scheuren. Het verschil in thermische uitzetting tussen beide mortels werkt dit ook in de hand. Daarom is het van belang een gepaste keuze te maken bij het hervoegen van metselwerk.

| KEUZE VAN HET VOEGTYPE

Het voegtype is minder van belang voor structurele schadenomenen. Uit historisch belang is het gewenst om bij herstellingen het nieuwe voegtype te laten overeenkomen met het oorspronkelijke zodat er zo weinig mogelijk historische informatie verloren gaat. De keuze van voegtype is wel van belang bij wind- en watererosie. Uitpuilende voegtypes zijn, in tegenstelling tot een verdiepte voeg, meer vatbaar voor erosie en zullen sneller aangetast worden.

1.1.3| RESTAUREREN

De termen restauratiemortel en herstellingsmortel worden vaak door elkaar gebruikt. Het gebruik en de eigenschappen ervan zijn dan ook gelijkaardig. Beide mortels dienen ter herstelling van beschadigd metselwerk en moeten zo compatibel mogelijk met het origineel zijn. Echter, onder herstellingswerk wordt veelal lokaal herstellingswerk verstaan waarbij gebruik gemaakt wordt van een doorsnee mortel die op vlak van eigenschappen zo goed mogelijk aansluit bij het beschadigd metselwerk. Restauratie van historisch metselwerk is veeleer globaal en duurzaam herstellingswerk en kan worden gedaan met speciaal op de markt gebrachte restauratiemortels.

Aangezien restauratiemortels gelijkaardig zijn aan de mortels voor herstellingen zullen de voorwaarden inzake mortelkeuze, duurzaamheid en voegtype voor beide mortels toepasbaar zijn.

| DUURZAAMHEIDSEISEN RESTAURATIE

Caspar Groot, gespecialiseerd in duurzaamheidsgedrag van metselwerk, stelt samen met zijn collega, Jos Gunneweg, in zijn artikel voor de studiedag inzake vochtproblemen in massief metselwerk dat in de hedendaagse restauratiepraktijk voldaan moet worden aan de eisen van 'compatibility' en 'retreatability/repairability'. Onder 'compatibility' wordt in dit geval verstaan dat de reparatiemiddelen overeenkomen met het beschadigd metselwerk en hieraan geen verdere schade toebrengt. Zo hoort een restauratiemortel technisch compatibel te zijn op vlak van mechanische sterkte, vochtdoorlatendheid en thermische uitzetting met het reeds aanwezige gevelmateriaal. De eis inzake 'retreatability/repairability' houdt in dat het restauratiemateriaal eventuele latere herstellingen of aanpassingen niet in de weg mag staan. Zo vormt het restaureren van beschadigd kalkmetselwerk met cementmortel zowel een incompatibele restauratie als een niet te herstellen restauratie. De cementmortel creëert een waterdichte barrière en belemmert zo de vochthuishouding in het oorspronkelijk metselwerk. Een te sterke aanhechting tussen beide mortels zou resulteren in schade bij het herstellen of verwijderen van de restauratie. Deze principes kunnen ook toegepast worden bij herstellingen. [10]

| KEUZE VAN DE RESTAURATIEMORTEL

De keuze van restauratiemortel, ondanks het nuanceverschil in toepassing, is gelijkaardig aan de keuze van een herstellingsmortel. Zo horen de herstellingsmortel, of in dit geval de restauratiemortel, zo compatibel mogelijk te zijn op vlak van porositeit, thermische uitzetting als mechanische sterkte. Aangezien historisch metselwerk, tot aan de 20^{ste} eeuw, doorgaans is opgebouwd uit zachte kalkgebonden legmortel en zwak tot middelmatige gebakken gevelstenen, zijn cementgebonden restauratiemortels veelal niet aangewezen.

Kalkmortels zijn mechanisch gezien zwakke mortels. Wanneer deze worden hervoegd met een sterke cementmortel komt de vochthuishouding van het metselwerk in gedrang. Wanneer de restauratiemortel en originele mortel wel op elkaar afgestemd zijn wordt het vochttransport in het metselwerk en de krachtoverdracht tussen het origineel en nieuw metselwerk niet verstoord en resulteert het niet in schade. [6] [11]

| Zelfopoffering

Ondanks het feit dat kalkmortels een lagere druksterkte hebben dan cementmortels, zijn ze geschikter bij de renovatie van historisch metselwerk. Historische gevels zijn veelal opgebouwd uit zwakkere stenen waardoor een zachte kalkmortel aangewezen is. Daarnaast is het voordelig dat een mortel het zwakste element vormt in het metselwerk. Beweging en belasting op het metselwerk wordt namelijk opgenomen door het zwakste element. Aangezien mortel eenvoudiger en goedkoper kan worden vervangen dan beschadigd metselwerk is het voordelig om een zwakke mortel toe te passen bij renovatie. Wanneer een zwakke historische gevel gerenoveerd zou worden met een sterke cementmortel, zal het metselwerk de belasting op zich nemen en scheuren. Dit resulteert in een complexer en groter schadefenomeen. Daarnaast kan een pure luchtkalk, wanneer opgelost in water met carbonaatzuur (zure regen), microscheurtjes herstellen door te hercarbonateren in de scheuren. Het gebruik van luchtkalk brengt een zelfopoffering met zich mee, maar houdt ook enkele voordelen in ten opzichte van renovatiemortels op basis van cement. [6]

| Morteleigenschappen

De belangrijkste eigenschappen waarin restauratiemortels, in uitgeharde toestand, compatibel moeten zijn met het origineel metselwerk zijn onder te verdelen in vier categorieën. Ze horen vooreerst compatibel te zijn op vlak van mechanische sterkte en bouwfysische eigenschappen. Hieronder wordt begrepen dat de capillaire absorptie van water in de poriënstructuur, de waterdampdoorlatendheid, de thermische uitzetting en hygrische zwelling zo goed als mogelijk moeten overeenkomen. Chemische compatibiliteit wordt gezocht in het aandeel zouten en aandeel expansieve bestanddelen. Als laatste horen beide mortels overeen te komen op vlak van uitzicht. Om esthetische redenen horen de kleur, vorm en manier van verouderen compatibel te zijn.

Daarnaast hoort de restauratiemortel in niet uitgeharde toestand, goed verwerkbaar te zijn en een langzame krimp te hebben gedurende uitharding. De goede verwerkbaarheid hangt af van de hoeveelheid zand en bindmiddelen, de opbouw en soort van het zand, het type en bindmiddel en de eigenschappen van de gevelstenen. [6] [10] [12]

| Mortelanalyse

Om te verzekeren dat de restauratiemortel voldoet aan de eisen van 'compatibility' en 'repairability' wordt veelal een analyse van de beschadigde mortel gemaakt. Het WTCB stelt, in de 'Gids voor de restauratie van metselwerk', dat uit een microscopische analyse de types en korrelgroottes van het zand, toeslagstoffen (baksteenfragmenten of pigmenten) en de verhouding van het zand t.o.v. de toeslagstoffen kan worden bepaald. Caspar Groot stelt daarnaast dat ook de druksterkte, elasticiteit en porositeit van het beschadigd metselwerk best bepaald wordt. De specifieke eigenschappen van het aggregaat (zand, kalksteen of marmerfragmenten) en bindmiddel kan bepaald worden via een elektronenmicroscopie. Op basis van de resultaten van deze analyses wordt een compatibele restauratiemortel gekozen. [6] [10] [12]

| Zout metselwerk

Wanneer massief metselwerk met zout belast is, is het van belang dat de restauratiemortel een sterke mortel is die resistent is tegen chloriden en sulfaten. In deze gevallen wordt vaak gebruik gemaakt van een hydraulische kalk. Deze sterkere mortels zijn echter vaak niet compatibel met de historische mortel. Het kan slim zijn om voor een minder sterke, en minder duurzame, mortel te kiezen die sneller vervangen moet worden maar die als buffer kan dienen voor het metselwerk. De zwakkere mortel zal het zout opnemen, sneller degraderen en sneller moeten worden vervangen, maar kan op die manier de duurzaamheid van de muur verbeteren. [6]

1.1.4 | ANDERE TOEPASSINGEN

Naast het metselen en voegen bestaan er ook enkele kleinere toepassingsgebieden. Deze worden hier kort toegelicht maar vallen verder buiten het doel van deze thesis.

| PLEISTEREN

Een pleisterlaag is een dun mortellaagje dat aangebracht wordt op muren of plafonds. Afhankelijk van of de aanhechting op een binnenmuur of buitenmuur is, wordt er respectievelijk gesproken van stucwerk of crepi. Daarnaast is de samenstelling ook verschillend voor stucwerk en crepi.

Er bestaan twee soorten pleistermortel. Enerzijds zijn er de minerale pleistermortels en anderzijds, de iets nieuwere, kunstharspleistermortels. De minerale pleistermortels bestaan uit 'water met een of meerdere minerale bindmiddelen, granulaten en eventueel hulpstoffen en/of toeslagstoffen'. [13] De meest voorkomende minerale bindmiddelen bij crepi zijn gips, kalk of cement. Deze zijn iets ruwer van oppervlak, zelfreinigend en dampopen ten opzichte van de kunstharspleistermortels. Die laatste zijn daarentegen strakker, gladder en iets waterafstotender dan pleistermortels op basis van minerale bindmiddelen. Wanneer de mortel moet dienen tot bepleistering, wordt er vaak een iets fijner zand vermengd om zo een gladder oppervlak te kunnen verkrijgen. [13] [14]

De bindmiddelen en de mengverhoudingen bepalen de eigenschappen van de pleistermortels. Afhankelijk van het toepassingsgebied en nodige eigenschappen worden specificaties opgelegd waaraan pleistermortel, zowel verhard als vers, zou moeten voldoen. Deze zijn opgelijst in de norm NBN EN 998-1. In België gelden enkele Technische Voorlichtingen, respectievelijk TV 199, TV 201 en TV 209, als referentiedocumenten. [13]

| STUKADOREN

Men brengt een dunne pleisterlaag, enkele millimeters tot enkele centimeters, aan op binnenmuren zodat deze vlak worden voordat ze verder afgewerkt kunnen worden. Wanneer er ook profielen, sierlijsten of rozetten worden aangebracht wordt het pleisterwerk stucwerk genoemd. [15]

| CREPI

Crepi bestaat, in tegenstelling tot stucwerk, uit verschillende lagen. Zo wordt er gebruik gemaakt van een voorbereidende laag, een onderlaag en een afwerkingslaag. Af en toe wordt er ook nog een laag wapeningsmortel aangebracht. Het pleisteren van een buitengevel wordt courant gebruikt sinds de intrede van de spouwmuur. De bakstenen nemen in deze opstelling gemakkelijk vocht en water op, wat een nadeel vormt. Het gebruik van een pleisterlaag resulteert in een bescherming tegen vocht en een grotere luchtdichtheid.

1.2.3| BASTAARDMORTEL

Wanneer de voordelen van pure kalk- en cementmortels worden gecombineerd, spreekt men van bastaardmortels. Het resultaat is een mortel waarvan de verwerkbaar hoger en de krimp lager ligt dan bij een pure cementmortel. Door het aandeel cement als bindmiddel is de uiteindelijke hardheid en de vorstbestendigheid hoger is dan die van een pure kalkmortel. De kalk in het bindmiddel kan, door middel van herkristalliseren, microscheurtjes in het voegwerk overbruggen. Hierdoor krijgt de mortel een zelfhelend karakter. Figuur 2.5 [6] vat dit samen. Er zijn ook enkele nadelen aan verbonden. Zo vermindert de aanhechting aan de gevelstenen door de toevoeging van kalk aan de mortel. [6]

1.2.4| OVERZICHT

Monumentenwacht Vlaanderen rijkt een overzichtelijk schema aan van de meest gangbare verschillende mortelsoorten. Het schema werd gemaakt aan de hand van de tabel van J.Hughes en toont de onderlinge verschillen tussen verschillende morteltypes

EIGENSCHAPPEN VAN VERSCHILLENDE MORTELSOORTEN					
	Luchtkalk-mortel	Hydraulische kalkmortel	Puzzolaan-kalkmortel	Bastaard-mortel	Cement-mortel
Opmerking			hoe meer puzzolane stoffen, hoe dichter de eigenschappen aanleunen tegen cement-mortel	de eigenschappen zijn sterk afhankelijk van de verhouding kalk/cement	
Hechting	3				6
Sterkte (druk, buig, trek)	2				6
Vervormbaarheid, elasticiteit	6				1
Weerstand tegen regendoorslag	3				6
Vochtbestendigheid	2				6
Dampopenheid	5				3
Thermische uitzetting	1				2
Uithardingsnelheid	1				6

LEGENDE: 1 = laag, 6 = hoog.

Figuur 2.5| Eigenschappen verschillende mortelsoorten [6]

1.3| TIJDSLIJN MORTELS

In wat volgt wordt kort de evolutie van het morteltype en de metselpraktijk besproken aangezien de achtergrond van de mortels een belangrijke randconditie is geweest voor de samenstelling ervan.

1.3.1| EVOLUTIE VAN HET MORTELTYPE

Figuur 2.4 (zie Hoofdstuk 2, paragraaf 1.2) toont aan dat er een viertal producten voor handen zijn als bindmiddel voor mortel. Voor de allereerste mortels werden natuurlijke bindmiddelen gebruikt. Langzaam werd overgeschakeld op luchthardende bindmiddelen. In Griekenland en Italië werden niet veel later hydraulische mortels ontwikkeld waarbij het bindmiddel een hydraulische stof was. Eind de 19^{de} eeuw werd cement als nieuw hydraulisch bindmiddel ontwikkeld.

Dankzij de snelle verharding en hogere eindsterkte dan kalkgebonden mortels wordt cement sinds de 20^{ste} eeuw standaard gebruikt als bindmiddel bij metselwerk.

| KALKMORTEL

De eerste geschriften inzake de samenstelling van mortels zijn terug te vinden bij de Romeinen. Vitruvius beschreef, in *'De Architectura libri decem'*, de samenstelling van de toen gangbare kalkmortel. Deze samenstelling werd behouden tot aan de Middeleeuwen. Ten gevolge van de slecht georganiseerde handel was men toen verplicht de lokale mortelonderdelen te gebruiken voor het samenstellen van mortels. De samenstelling en eigenschappen verschilden bijgevolg van streek tot streek. Daarnaast kon, door de inaccurate bouwpraktijk, het gebeuren dat er vervuilde bestanddelen en toeslagstoffen vermengd werden in de mortel. De verhouding van de mortelonderdelen was bijgevolg verschillend voor elke mortel.

Tijdens de 16^{de} en 17^{de} eeuw werd vastgesteld dat mortels moesten uitdrogen om een voldoende eindsterkte te bereiken. Deze empirische vaststelling leidde tot het later begrijpen van carbonatatie van mortel. Carbonatatie is het proces waarbij calciumhydroxide, de alkalische bestanddelen in de mortel, reageert met koolstofdioxide uit de lucht. Dit leidt tot de uitharding van de mortel en kan pas plaats vinden na voldoende uitdroging. In de 18^{de} eeuw werd de aanzet gegeven tot de ontdekking en het begrijpen van hydraulische reacties. Deze nieuwe kennis leidde tot de ontwikkeling van cement, eind 18^{de} eeuw, en uiteindelijk het tot stand komen van cementmortels. [12] [14] [16]

| CEMENTMORTEL

Het hydraulisch bindmiddel dat ontwikkeld werd door de Romeinen, een mengeling van vulkanisch as en luchtkalk, vormde een eerste soort cement.

Wanneer men tijdens de 17^{de} eeuw, uit enkele empirische vaststellingen, het uitharden van mortel had ontdekt, ontstond, tijdens de 18^{de} eeuw, een toename aan wetenschappelijk onderzoek naar de samenstelling en het gebruik van bindmiddelen. Verschillende onderzoekers kwamen gedurende dezelfde periode, onafhankelijk van elkaar, tot de ontdekking dat de verharding van kalk, onder invloed van water, samengaat met de aanwezigheid van kleibestanddelen in kalksteen. Deze inzichten waren de beginnende van de cementchemie en de aanleiding tot nieuw onderzoek tijdens de 18^{de} en 19^{de} eeuw. Door te experimenteren met de samenstelling werden er verschillende nieuwe bindmiddelen ontwikkeld. Het toepassen van mergel, een kalksteen met een hoog percentage aan kleimineralen, leidde tot de ontwikkeling van cement als bindmiddel, hetgeen ook Romaancement of Parkers cement wordt genoemd. [12]

Tijdens de 19^{de} eeuw werd het Portlandcement, het eerste kunstmatige cement, ontdekt door Joseph Aspdin door het ontwikkelen van kunstmatige mengsels van klei en krijt. Hij ontdekte dat het cement even sterk als duurzaam was als de Portlandsteen zelf. De samenstelling en basisprincipes bleven, maar ten gevolge van wetenschappelijk onderzoek ontwikkelde men verfijningen en varianten. Zo ontdekte men dat het sinteren, aaneenklitten van fijngemalen materialen door smelting, van kalk en klei betere resultaten gaf. Vanaf het begin van de twintigste eeuw werd portlandcement als bindmiddel gebruikt in metselmortel in Europa. Stilaan verving het portlandcement het gebruik van lucht- en hydraulische kalk. [12]

1.3.2 | METSELPRAKTIJK VANDAAG EN IN DE TOEKOMST

| HEDENDAAGSE PRAKTIJK

Dankzij de grote eindsterkte en snelle uitharding van portlandcement werden cementmortels meer en meer toegepast. Zo nam ook in België het gebruik van kalk als bindmiddel voor metselmortels af. Ook de homogeniteit waarmee het portlandcement geproduceerd kon worden gaf grote voordelen in vergelijking met kalkmortels, waarvan de samenstelling afhankelijk was van de grondstoffen. [14]

De soorten bindmiddelen zijn ondertussen ook uitgebreid en geëvolueerd. Zo wordt er sinds de 19^{de} eeuw gebruik gemaakt van Rijns tras. Tras vormt in combinatie met kalk of cement een hydraulisch bindmiddel. Met tras gebonden mortels worden aangeduid als trasmortel en vormen een specifieke puzzolaanmortel. [11]

Het combineren van cement en kalk als bindmiddelen voor een mortel resulteert in een mortel die het beste van beide bindmiddelen combineert. De mate waarin eigenschappen verbeteren is sterk afhankelijk van de verhouding kalk op cement. Figuur 2.5 [6] verduidelijkt dit principe. [6] [14]

| RESTAURATIEMORTELS

Ondertussen blijkt echter dat niet alle cementgebaseerde mortels even duurzaam zijn als kalkmortels. Zandcementmortels met een groot aandeel aan cement geven bijvoorbeeld aanleiding tot lekkend metselwerk na enige tijd. Ook zorgt het cement, als dit in grote hoeveelheid aanwezig is in de mortelsamenstelling, voor brosheid, grotere krimp en bijgevolg voor een minder goede aanhechting met de bakstenen. Dit alles resulteert in meer kans op waterdoorslag.

Cementmortels zijn min of meer compatibel en dus in theorie bruikbaar als mortel voor restauraties. In praktijk kan het echter zijn dat er vorstschade optreedt ten gevolge van de nadelige invloed van cementmortel op de vochthuishouding in kalkgebonden metselwerk. De verminderde porositeit zorgt ervoor dat de cementmortel slecht vochtdoorlatend is.

Door een vernieuwde aandacht voor duurzaam bouwen is er, vanuit de restauratiesector, een nieuwe interesse ontstaan in het gebruik van kalkgebonden mortels. Experts verdenken cementmortels ervan aan de oorzaak te liggen van schade aan restauratiemetselwerk en jong hervoegwerk. Zo werden er specifieke restauratiemortels ontwikkeld die compatibel zijn met de historisch gebruikte materialen. Op die manier zou dit leiden tot duurzaam restauratiewerk. [10] [14]

| TOEKOMST

Vaker en vaker wordt het traditioneel metselwerk vervangen door betonnen structuren. Maar ook binnen de metselpraktijk evolueert de techniek langzaam. Zo werd bijvoorbeeld de techniek van verlijming ontwikkeld. Enkele belangrijke spelers op de markt promoten deze techniek omdat het verlijmen van bakstenen en gevelstenen tijdbesparend, waterafstotend en sterker zou zijn. Daarnaast zou het esthetisch gezien ook een mooiere oplossing zijn. Tijd en verdere onderzoeken zullen de resultaten op lange termijn nog uitwijzen.

Ook vanuit de restauratiesector werden nieuwe technieken ontwikkeld. Aangezien men bij het restaureren van (historisch) metselwerk gelimiteerd is in materialen en technieken wordt er gezocht naar nieuwe manieren om metselwerk te beschermen en renoveren. Zo kunnen bakstenen bijvoorbeeld worden gehydrofobeerd teneinde de waterdichtheid te verbeteren. Het materiaal wordt op die manier hydrofoob en stoot zo het vocht en vuil af. Ook voor onvolmaaktheden tijdens de metselwerken kan hydrofoberen een zinvolle oplossing zijn. Hieromtrent is onderzoek nog volop bezig. Een dieper onderzoek inzake het hygrothermische gedrag van historische bakstenen na hydrofobering werd uitgevoerd door Saskia De Mol.

1.4| CHEMISCHE ACHTERGROND

1.4.1| CHEMISCHE PROCESSEN IN DE MORTEL

| KALK-CYCLUS

Kalk is de term die gebruikt wordt voor een calcium-houdend alkalisch zout. Enkele voorbeelden zijn calciumoxide, calciumhydroxide en calciumcarbonaat. Deze drie vormen van kalk zijn belangrijke componenten in de kalkcyclus. Kalk komt voornamelijk voor onder de vorm van calciumcarbonaat (CaCO_3) in kalksteen en mergel. Beide zijn gesteentes, gevormd uit organisch materiaal. Kalksteen is een sedimentair gesteente en mergel is een afzettingsgesteente, vooral voorkomend in ondiep zeewater. Daar waar kalksteen voornamelijk bestaat uit calciumcarbonaat, is mergel verontreinigd is met kleimineralen waardoor de cementering, verdichting van de poriën ten gevolge van neerslag van mineralen, minder goed verloopt dan kalksteen. [14] [17]

| Branden en blussen

Nadat kalksteen is ontgonnen, wordt deze versneden, verpulverd of gebroken om zo te worden 'verbrand' in een kalkoven. De ontbinding gebeurt aan een temperatuur van 1000°C en zet kalksteen om in calciumoxide (CaO). Dat calciumoxide, of ongebluste kalk, kan worden gebruikt bij het aanmaken van kalkzandsteen of worden geblust. Het blussen van calciumoxide gebeurt met water in een kalkoven (lime kiln) en kan 'nat' of 'droog' zijn, afhankelijk van de hoeveelheid water. Wanneer een overmaat aan water wordt toegevoegd spreekt men van 'nat blussen' en wordt er een nat 'kalkdeeg' gecreëerd. Als de hoeveelheid toegevoegd water echter beperkt blijft, gebeurt het blussen langzamer, komt er zo langzamer warmte vrij en kan het eventuele overtollige water worden verdampt. Op die manier wordt een droog 'kalkpoeder' ontwikkeld. Zowel het kalkpoeder als het kalkdeeg dienen als bindmiddel voor mortels.

De bijhorende reactievergelijkingen van de beschreven procedés worden hieronder weergegeven.

Branden van kalksteen: $\text{CaCO}_3 \xrightarrow{\text{warmte}} \text{CaO} + \text{CO}_2$ [volumetoename]

Blussen van calciumoxide: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{warmte}$ [volume-afname]

| Luchthardende en waterhardende bindmiddelen

Typisch gezien wordt 1 deel bindmiddel (calciumhydroxide, verkregen na blussen) met 3 delen granulaat en 1 deel water gemixt tot een mortel. Na verwerking kan de gebluste kalk in de mortel langzaam met koolstofdioxide in de lucht of regenwater interageren en carbonateren. In dit geval spreekt men van een luchthardend bindmiddel of luchtkalk. De bijhorende reactievergelijking wordt hieronder weergegeven.

Carbonatatie: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

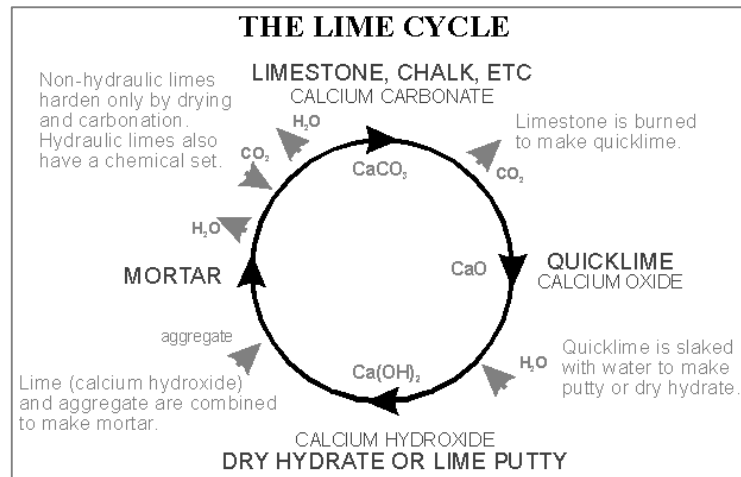
Een luchtkalk kan zowel door nat als droog blussen verkregen worden uit een zuiver kalksteen en bevat minstens 95% calciumhydroxide. Ze kan worden gebruikt voor pleisters en als bindmiddel voor mortels. Een pure kalk, of luchthardende kalk, kan opgelost worden in water waarin een carbonaatzuur is opgelost, bijvoorbeeld zure regen. Waardoor het een zelfhelend karakter krijgt. De opgeloste kalk kan namelijk in kleine scheurtjes vloeien, opnieuw verharden en zo de scheurtjes herstellen.

Wanneer kalksteen verontreinigd is met kleipartikels zal ongeblust kalk, na blussen, resulteren in een hydraulische kalk, of een waterhardend bindmiddel. De hoeveelheid aanwezige klei in hydraulische kalk bepaalt de sterktegraad en de snelheid van het blussen en verharden. Hoe groter de hoeveelheid aanwezige klei (tussen de 5% en 30%) hoe trager het blussen zal gaan, maar hoe sneller de kalk zal uitharden. Wanneer kalk een grote hoeveelheid kleipartikels bevat, en deze slechts traag kan geblust worden, zal deze resulteren in een sterk eindresultaat dat bestand is tegen extremere condities dan wanneer deze een kleine hoeveelheid kleipartikels bevat. Aangezien deze bindmiddelen harden in aanwezigheid van water, kunnen ze niet carbonateren aan de lucht en kunnen natuurlijke hydraulische kalken enkel verkregen worden uit het droog blussen van calciumoxide. Kunstmatige hydraulische kalk wordt bekomen door kleipartikels toe te voegen aan niet-hydraulische kalk tijdens het branden ervan, of door een puzzolaan toe te voegen bij het vermengen tot mortel. Het verharden van deze hydraulische bindmiddelen in aanwezigheid van water (de hydratatie van hydraulische kalk) gaat sneller door dan de carbonatatie van luchtkalk. Hierdoor moet metselwerk, dat gevoegd werd met luchtkalk, beschermd worden tegen vorst gedurende drie maand. Door de tragere verharding zijn sommigen van mening dat verharding door carbonatatie resulteert in een betere mortel. Hieromtrent zijn echter nog enkele meningsverschillen.

Een half-hydraulische kalk zal initieel verharden in water en verder verharden in lucht. Deze kalk zal echter nooit volledig uitharden onder enkel en alleen water.

| Kalk-cyclus

Bovenstaande beschreven processen kunnen worden samengevat in de zogenaamde kalk-cyclus (lime cycle), waarvan figuur 2.6 [18] een overzicht toont. Vertrekkende van, in de natuur voorkomend, kalksteen (limestone), wordt calciumoxide, of ongebluste kalk (quicklime), ontwikkeld via het branden van kalk. Deze ongebluste kalk kan worden gebruikt bij het aanmaken van kalkzandsteen, of verder worden geblust, met water, tot calciumhydroxide (gebluste kalk). Afhankelijk van de hoeveelheid water spreekt men van 'droog' en 'nat' blussen en wordt een luchthardend of waterhardend bindmiddel gecreëerd. Deze worden met granulaten en water gemixt tot mortel en dan verwerkt. Luchthardende mortels kunnen CO_2 , in regenwater of lucht, terug opnemen en zo carbonateren, of verharden tot kalksteen. Dit carbonateren van mortels is niet mogelijk in de aanwezigheid van puur water, zonder opgeloste CO_2 , of in het midden van een bredere muur, door de afwezigheid van lucht.



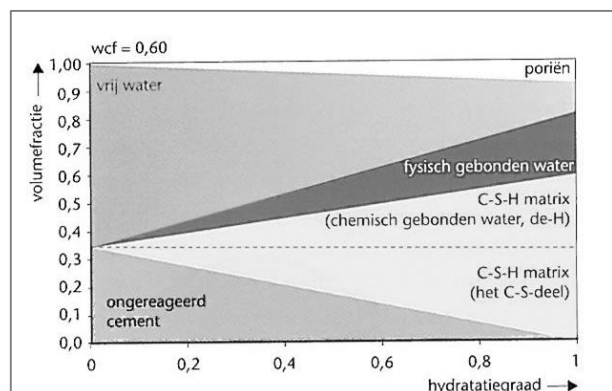
Figuur 2.6| De kalk-cyclus [18]

| Puzzolane stoffen

Ten tijde van de Romeinen werd een puzzolane stof, in dit geval vulkanische as, toegevoegd aan de componenten van de kalkmortel hetgeen resulteerde in een eerste hydraulische mortel. Op die manier hydrateerden de mortels, in aanwezigheid van omgevingswater, langzaam tot een sterk 'cement'. Nu nog worden puzzolane stoffen toegevoegd aan niet-hydraulische mortels om een kunstmatige hydraulische mortel te verkrijgen. Enkele voordelen van een hydraulische mortels is de hogere sterkte, betere druksterkte en de mogelijkheid te verharden in meer extreme omstandigheden. [14] De hydrauliteitsindex is een belangrijke factor dat wordt toegekend aan mortels en aangeeft wat de verhouding hydraulische bestanddelen is ten opzichte van het geheel. Op die manier kan worden aangetoond hoe sterk de mortel vervuld is met kleipartikels of hoe puur deze is. De index is een handig middel om het verschil aan te duiden tussen verschillende historische mortels en diens eigenschappen. [14]

| HYDRATATIE VAN CEMENT

Tijdens de 18^{de} en 19^{de} eeuw werd, na nieuwe inzichten inzake carbonatatie en de aanwezigheid van kleimineralen, geëxperimenteerd met de samenstelling van hydraulische bindmiddelen voor mortels. Tijdens de 19^{de} eeuw werd het Portlandcement, het eerste kunstmatige cement, ontwikkeld door Joseph Aspdin uit klei en kalksteen in steenkoolovens. Aangezien cement een hydraulisch bindmiddel is, verkrijgt het zijn sterkte door hydratatie in aanwezigheid van water. Wanneer het cement met granulaten en water wordt vermengd teneinde een cementmortel te verkrijgen, zal het cement interageren met het vrije mengwater. Het water zal zowel fysisch als chemisch binden met de cementdeeltjes. Wanneer het water zich chemisch bindt met de cementdeeltjes wordt een C-S-H-matrix gevormd. Deze cementshydraten (calciumsilicaathydraten) vormen een netwerk tussen de cementdeeltjes en vormen de sterkte van het cement. Het fysisch gebonden water bevochtigt het oppervlak van het C-S-H-netwerk en kan niet verder chemisch worden gebonden. Wanneer al het water gebonden is, of geïsoleerd is in poriën, stoppen de bindingen tot cementshydraten en is de eindsterkte gevormd. Het is mogelijk dat het eindproduct nog ongereageerd cement bevat. Figuur 2.7 [19] geeft bovenstaande processen schematisch weer. [12]



Figuur 2.7| Hydratatiegraad cement [19]

1.4.2| SAMENSTELLING VAN DE MORTEL

| KALKMORTELS

Traditionele kalkmortels (vanaf de 19^{de} eeuw) zijn vervaardigd uit 1 volumedeel bindmiddel, in dit geval kalk, op 1 volumedeel water en 3 volumedelen toeslagmateriaal. Het toeslagmateriaal, of aggregaat, is meestal fijnkorrelig zand. Bij oudere mortels, 18^{de} eeuw en ouder, werd bijna een gelijkwaardige hoeveelheid vette steenkalk toegevoegd aan de hoeveelheid zand. Er zijn echter vele verschillende volumeverhoudingen voorhanden. Een volumeverhouding bindmiddel op zand tussen 1:1 en 1:2 vormt een gemiddelde aanname van de toenmalige praktijk. [11] [14]

De hedendaagse volumeverhouding zou afkomstig zijn van het idee dat kalk de lege holtes tussen de zandpartikels zou opvullen. Aangezien de lege holtes zich 1:3 verhouden ten opzichte van het volume zand, is de verhouding kalk op zand bijgevolg ook 1:3. Bij kant en klare mortels, en bijgevolg ook voor deze thesis, wordt er gewerkt met de vooropgestelde volumeverhouding van de fabrikant van het bindmiddel. De gebruikte verhoudingen van de verdere proeven (zie Hoofdstuk 7) zijn samengevat weergegeven in tabel 2.1.

Tabel 2.1| Verhoudingen kalkmortels

HYDRAULISCHE KALK	
Remmers KALK ®	
KALK	1 deel
water	0.56 delen (56%)
zand	2 delen
LUCHTKALK	
Cantillana Tradimur ®	
Tradimur	1 deel
water	0.14 delen (14%)

| CEMENTMORTELS

Aangezien cement een hydraulisch bindmiddel is op basis van o.a. klei en kalksteen, kan deze evenzeer worden gebruikt worden als bindmiddel in de traditionele volumeverhouding waarbij 1 volumedeel bindmiddel, in dit geval cement, op 1 volumedeel water en 3 volumedelen toeslagmateriaal wordt gemengd. Bij kant en klare mortels, en bijgevolg ook voor deze thesis, wordt er gewerkt met de vooropgestelde volumeverhouding van de fabrikant van het bindmiddel. De gebruikte verhoudingen van de verdere proeven (zie Hoofdstuk 7) zijn samengevat weergegeven in tabel 2.2.

Tabel 2.2| Verhoudingen cementmortel

CEMENT	
Cantillana Mur 8/2 – metselmortel M5 - ®	
Mur 8/2	1 deel
water	0.13 delen (13%)

| RENOVATIEMORTELS

Bij het herstellen, renoveren of restaureren van historisch metselwerk is het van uitermate belang dat de renovatiemortel op vlak van mortelsamenstelling en morteleigenschappen zo goed mogelijk overeenkomt met de te renoveren mortel. Daarnaast kan een esthetische overeenkomst gewenst zijn. Omdat historische mortels niet volgens huidige methodes vervaardigd zijn en bijgevolg niet beantwoorden aan de huidige normen en voorschriften, en omdat de materialen nu zuiverder en fijner zijn is het erg moeilijk de historische mortels na te maken. Door de volumeverhouding, het type bindmiddel en soort aggregaten te wijzigen kunnen de eigenschappen van de historische mortel benaderd worden. Doordat hedendaagse mortel minder onzuiverheden bevat en de kleur van de voeg over de jaren heen wijzigt, is het echter moeilijk op voorhand een gelijkaardige mortel te mengen. [6]

| Volumeverhouding kalkrenovatiemortels

Monumentenwacht Vlaanderen rijkt een tabel aan die een hulpmiddel vormt bij het bepalen van de volumeverhouding van kalkmortels ter herstelling en restauratie van beschadigd kalkmetselwerk. De tabel werd vrij vertaald naar de tabellen voor de keuze van voegmortels uit het onderzoek van de English Heritage [20]. Tabel 2.3 [6] toont deze tabel en geeft mogelijke mortelsamenstellingen weer op basis van de aard, de conditie en de vochtbelasting van het metselwerk. Algemeen genomen wordt een verhouding bindmiddel op aggregaten van 1:2.5 gehanteerd.

LEIDRAAD BIJ MORTELKEUZE OP BASIS VAN KALK																									
Bindmiddelen					Puzzolanen			Aggregaten			Aard van het metselwerk			Hard / stevig metselwerk				Gemiddeld metselwerk				Zwak metselwerk			
Lichtkalk (pastal)		Hydraulische kalk			trass/aggregaten			trass/aggregaten			trass/aggregaten			trass/aggregaten			trass/aggregaten				trass/aggregaten				
C/D/L		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				
N/H/L/S		N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S			N/H/L/S				N/H/L/S				

omstandigheden en verweringsprocessen ten gevolge van wind, water en zon. Deze zijn bijgevolg het moeilijkst te voorkomen.

| MECHANISCHE SCHADEFENOMENEN

Mechanische werkingen zijn veelal te herleiden tot menselijke fouten in het ontwerp, de uitvoering of bij herstellingen. Af en toe liggen ook natuurlijke fenomenen aan de oorzaak van mechanische schade.

| Ontwerpfouten

Kleine fouten of onvolmaaktheden kunnen na oplevering leiden tot schade. De juiste materiaalkeuze, de geschikte uitvoeringstechniek en de detaillering van het gebouw liggen aan de basis van een goed ontwerp. Fouten als een slechte afwatering of verkeerde dimensionering kunnen verstoppingen, opspattend of aflopend water langs de gevel als gevolg hebben. Waterafstroming langs de gevel leidt voornamelijk tot esthetische schade maar kan ook, in het geval van zachte materialen zoals kalkgebonden mortels, leiden tot uitspoeling. Het water kan op die manier verder en dieper dan gewenst de gevel indringen en leiden tot grote vochtschade in de massieve metselwand.

Fouten in de dimensionering van de funderingen, trillingen en een verkeerde inschatting van de grondwaterstand kunnen leiden tot zettingen in de grond. Afhankelijk van de gemaakte fout en de grondopbouw zijn deze zettingen differentieel of absoluut. Absolute zettingen vormen, structureel gezien, een minder groot probleem dan differentiële zettingen aangezien de hele grond verzakt en het gebouw in zijn geheel wegzakt. Bij differentiële zettingen gebeurt het dat bepaalde delen van het gebouw meer verzakken dan andere delen, ten gevolge van verschillen in funderingstype of – dimensies. Deze heterogene verzakkingen leiden tot structurele schade en scheuren in het metselwerk. Kleine verzakkingen over tijd kunnen opgevangen worden door plastische voegmortels, zoals kalkgebonden mortels, maar dit gaat niet voor vergaande differentiële zettingen. Door de verhoogde plasticiteit worden de horizontale voegen gegolfd zonder tot scheurvorming te leiden. De 'hardere' en minder plastische leg- en voegmortels zoals cementmortels kunnen zich niet mee zetten.

| Uitvoeringsfouten

Het spreekt voor zich dat een goede bouwpraktijk leidt tot minder schade fenomenen. Technische fouten bij het metselen kunnen resulteren in scheuren in het metselwerk. De verkeerde voegtechniek, het verkeerde voegmateriaal, metselen bij foute weersomstandigheden of een verkeerd voegtype toepassen kan resulteren in nuanceverschillen en tot schade op lange termijn. Een juiste uitvoeringstechniek is daarnaast ook uitermate belangrijk bij het herstellen van metselwerk.

| Herstellingsfouten

Sommige herstellingen worden uitgevoerd met de beste bedoelingen maar resulteren toch in schade achteraf. Zo kan het bestrijden van optrekkend vocht, het toepassen van een waterdichting of het uitvoeren van een reparatie, waarbij geen rekening is gehouden met de muureigenschappen, leiden tot het vormen van waterdichte barrières tussen de leg- en voegmortel of op het geveloppervlak. Enerzijds blijft het hemelwater en capillair water zich opstapelen achter die barrière waardoor het metselwerk niet genoeg kan uitdrogen. Wanneer er sprake is van een lange vorstperiode, bevriest dit water en leidt de bijhorende uitzetting van het water tot scheuren in het metselwerk. Anderzijds verzamelen de zouten zich samen met het water achter de barrière. Wanneer het water verdampt, blijven de zouten achter en vormen deze een neerslag op het porie-oppervlak. Wanneer deze neerslag zich in het metselwerk bevindt kan de hygrothermische eigenschap, ook wel de wateraantrekkende eigenschap genoemd, van zouten leiden tot schade. Door die eigenschap trekken de zouten vocht aan waardoor ze gaan klonteren. Deze kristalvorming oefent druk uit op de wanden van de poriën van het poreus materiaal. Enerzijds creëert dit fenomeen vochtplekken, anderzijds ontstaan scheuren in de wand ten gevolge van het uitzetten en kristalvormen van de zouten.

Naast de vorming van waterdichte barrières kan een gevelreiniging ook schadelijk zijn voor het metselwerk. Het water wordt onder druk op de gevel gesproeid en wordt op die manier in zachte mortels ingedruwd. Op die manier kan het water verder en dieper indringen in het metselwerk. Zandstraling heeft dezelfde gevolgen. Gevelreiniging met (zure) schoonmaakmiddelen leidt veelal tot chemische schade. De schoonmaakmiddelen bevatten veelal agressieve reagentia dewelke kunnen opgelost worden in het capillaire water en zo schade aanrichten middenin het metselwerk.

Een verkeerde mortelkeuze kan leiden tot spanningen en scheuren. Wanneer een harde voegmortel, zoals cementgebonden mortels, over een zachte legmortel wordt gelegd is het grootste probleem vaak te wijten aan het verschil in thermische uitzettingen. Op plaatsen waar het temperatuurverschil het grootst is (voornamelijk de zuidkanten) leidt dit tot spanningen en eventueel tot scheuren.

| FYSISCH SCHADEFENOMENEN

Hieronder worden enkele natuurlijke fenomenen besproken die aan de oorzaak liggen van fysische schadenfenomenen en veelal moeilijk te voorkomen zijn. De natuurlijke verweringsprocessen zijn ten gevolge van wind, water en zon. De schadenfenomenen worden ook als volgt opgedeeld.

| Zon

Zoals hierboven beschreven is de zon verantwoordelijk voor enkele belangrijke temperatuurschommelingen. Grote temperatuurschommelingen, tussen dag en nacht, en aan de zuidkant, kunnen leiden tot spanningen tussen verschillende leg- en voegmortels als deze een groot verschil in thermische uitzetting hebben. Daarnaast bevorderen grote temperatuurschommelingen ook de kristallisatie van zouten

| Water

De capillaire werking in het massief metselwerk vormt de basis van het belangrijkste schadenfenomeen ten gevolge van waterwerking. Het water dat doorheen de poriën van poreuze materialen stroomt, resulteert in vochtveranderingen en in de verplaatsing van zouten hetgeen nefast is voor poreuze materialen. Het water verplaatst zich naar de warmst mogelijke positie in het materiaal waar het bijgevolg gemakkelijk kan verdampen. Tijdens die verplaatsing is het echter mogelijk dat het water allerlei materiaal met zich mee vervoert. Deze kunnen van het poreus materiaal zelf afkomstig zijn of van nefaste polluenten in de lucht, en kunnen zo de voeg verdichten en een barrière vormen. Wanneer het water verdampt worden de opgeloste materialen (voornamelijk zouten) afgezet op het oppervlak van de poriën in het poreus materiaal. Dit principe wordt ook wel 'moleculaire adsorptie' genoemd.

De hygrothermische eigenschap, ook wel de wateraantrekkende eigenschap genoemd, van zouten is het meest schadelijk voor de poreuze materialen. Ze trekken het water uit het materiaal aan en gaan klonteren. Deze kristalvorming oefent druk uit op de wanden van de poriën van het poreus materiaal. De positie van de kristallisatie bepaalt het schadenfenomeen. Wanneer de kristallisatie zich bevindt op het oppervlak van de buitengevel vormt dit zoutuitbloeiing. Deze vormen vooral een esthetisch probleem en kunnen eenvoudig weggeschrobd worden. Wanneer het zout echter kristalliseert in het poreuze materiaal zelf creëert dit vochtplekken en ontstaan er scheuren ten gevolge van de, bij kristallisatie gepaard gaande, uitzetting. Wanneer zouten in oplossing blijven in het capillaire water trekken ze het vocht uit de lucht aan en blijft het metselwerk op die manier te lang vochtig, waardoor het niet kan uitdrogen.

Bij lange vorstperiodes kan het capillaire water bevroren. De daarbij gepaard gaande uitzetting zorgt voor scheuren in het metselwerk. Enorme temperatuur- en vochtschommelingen werken dit fenomeen in de hand.

Naast de capillaire werking is de invloed van water uitermate belangrijk wanneer deze in rechtstreeks contact komt met het metselwerk en de voegen. Voeg- en of legmortel dat direct wordt blootgesteld aan water zal sneller verweren. Normaal gezien, wanneer het metselwerk goed is uitgevoerd, bevat het materiaal uiterst weinig water na uitdroging en uitharding. Door de porositeit van de materialen is er sprake van capillaire werking in het metselwerk. Dit vormt vooral schade wanneer het metselwerk niet de kans krijgt volledig uit te drogen. Wanneer dit gebeurt of water stagneert door verkeerde mortelkeuzes bevriest het water bij vorst. Het water zet uit en zal tot horizontale scheuren leiden in het gevelwerk.

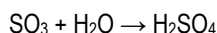
| Wind

Natuurlijke veroudering en erosie hebben een grote invloed op het metselwerk. Zo schuurt winderosie zand- en stofdeeltjes tegen de gevel en leidt aflopend regenwater tot uitspoeling. De invloed van de erosie is afhankelijk van de locatie op het metselwerk en van de mortelsoort. Zo hebben hoeken en uitstekend metselwerk meer kans om onderhevig te zijn aan wind- en watererosie. Geknipte voegen hebben, in tegenstelling tot verdiepte voegen, het meest te lijden onder erosie. Figuren 2.2 en 2.3 [6] illustreren dit.

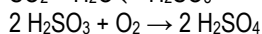
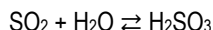
| CHEMISCH SCHADEFENOMENEN

Metselwerk wordt blootgesteld aan schadelijke stoffen die via wind- en watererosie in contact komen met de gevelstenen en leg- en voegmortel. Zowel natuurlijke componenten als kunstmatig ontwikkelde reactieproducten worden verstaan onder schadelijke stoffen.

Schadelijke oxides komen vrij bij de verbranding van fossiele brandstoffen (aardgas, aardolie en steenkool). Enkele schadelijke nevenproducten die gevormd worden zijn zwaveloxides, stikstofoxides en koolstofdioxides. Steenkoolhoudende brandstoffen bevatten ook zwavel. Bijgevolg worden zwaveloxides (NO_x) gevormd als bijproduct bij de verbranding. Bij de reactie van zwaveltrioxide met water wordt zwavelzuur gevormd.



De omzetting van zwaveldioxide in zwavelzuur gebeurt in twee stappen. Het zwaveldioxide wordt gevormd tot zwaveligzuur in aanwezigheid van water. Het zwaveligzuur wordt geoxideerd door het zuurstofgas in de lucht tot zwavelzuur.



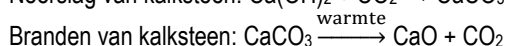
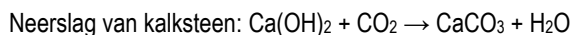
Het gevormde reactieproduct, zwavelzuur, wanneer opgelost in regenwolken, leidt tot zure regen, hetgeen een belangrijke oorzaak van verwerking van het metselwerk is. Een bijkomend probleem vormt zich wanneer het metselwerk gevoegd is met een kalkhoudende mortel. Zwaveloxides reageren, in aanwezigheid van water, met kalk tot gips. Het gips vormt een afdichting op het metselwerk en vormt een waterdichte barrière. Dit mechanisme, dat hier nadelig is voor het metselwerk, wordt gebruikt bij het ontzwavelen van brandstoffen. Het ongewenste nevenproduct wordt op deze manier omgezet in een minder schadelijk en bruikbaar product zoals gips. [21]

Naast het feit dat sulfaten, nitraten, chloriden en koolstofdioxide leiden tot milieuverontreiniging en andere klimatologische problemen, verontreinigen ze ook de lucht. Wanneer deze lucht in contact komt met het metselwerk zal deze sneller verwerken.

| KALKMORTELS

Er dient extra aandacht te worden besteed in het geval van kalkgebonden mortels aangezien dit type mortels aan bepaalde schadeverschijnselen extra gevoelig is. Kalkmortels hebben een verhoogde porositeit en houden het water langer vast. Op die manier vormen ze een aangenaam klimaat voor mossen en begroeiing en zijn ze gevoeliger aan biologische aantasting dan minder poreuze mortels, zoals cementmortels. Daarnaast vormen de wortels van de begroeiing zuren in de mortel en houden ze het vocht langer vast. Lucht verharde kalkmortels zijn nog gevoeliger aan klimop en begroeiing aangezien ze aan de buitenzijdes beter versteend zijn dan tussen de bouwstenen. Een ruwer oppervlak leidt sneller tot aanhechting van begroeiing en neemt sneller water op.

Daarnaast is het niet onbelangrijk dat gebluste kalk bij hoge temperaturen terug kan reageren tot ongebluste kalk. Bij hoge temperaturen (zoals woningbrand) stijgt de temperatuur en komt CO₂-gas vrij. In contact met gebluste kalk, aanwezig in kalkmortels, slaat calciumcarbonaat (of kalksteen) neer. Bij hoge temperaturen wordt het calciumcarbonaat thermisch ontleed tot ongebluste kalk en koolstofdioxide. De reactie houdt bijgevolg zichzelf in stand, hetgeen kan resulteren in thermische spanningen (zie Hoofdstuk 2, paragraaf 1.4.1).



Wanneer niet uitgehard calciumhydraat kan oplossen in water, kan deze, door capillaire werking, vervoerd worden. Wanneer deze neerslaat aan het oppervlak van het metselwerk vormt deze een witte kalksluier. Dit mechanisme wordt ook kalkuitloging genoemd.

1.5.2 | HERSTELLINGEN

Wanneer de gevelstenen of de mortel niet bestand genoeg is tegen de aanwezige mechanische, fysische en chemische werkingen kunnen er herstellingen uitgevoerd worden teneinde het metselwerk te beschermen tegen verdere verwerking. Niet elk schadeverschijnsel vereist herstellingen. Zo vormt lichte verwerking van het voegwerk niet altijd een cruciaal probleem en worden herstellingswerken zelfs afgeraden. Indien mogelijk wordt het niet herstellen van het metselwerk verkozen boven lokale herstellingswerken. Wanneer lokale herstellingswerken (waarbij enkel de beschadigde delen van het metselwerk hersteld worden) niet voldoende zijn, kan worden geopteerd voor globaal herstellingswerk. Hierbij wordt volledige gevelvlak vernieuwd. Bij historisch metselwerk wordt deze praktijk echter zoveel mogelijk vermeden om de authenticiteit van het gebouw te behouden. [6]

| KEUZE VAN DE MORTEL

Hierbij is het belangrijk dat de herstellingsmortel verenigbaar is met de eigenschappen van het meest poreuze element van het beschadigd gevelwerk. Best komen beide overeen in hardheid, thermische uitzetting en waterabsorptiecoëfficiënt.

Wanneer het verschil in hardheid tussen de verschillende mortels te groot is kan dat leiden tot spanningen en scheuren. Veelal zijn deze ook te wijten aan een groot verschil in thermische uitzetting tussen beide mortels. Een harde mortel is bijgevolg af te raden bij het herstellen van 'zachtere' mortels. Zo worden harde cementmortels enkel gebruikt bij het

herstellen van met cementmortel gevoegd metselwerk. Als er een te groot verschil is in porositeit of waterabsorptiecoëfficiënt tussen beide mortels is het mogelijk dat een waterdichte barrière wordt gevormd, hetgeen leidt tot scheuren. Het capillair water stagneert namelijk achter de waterdichte barrière. Bij vorst of bij afzetting van de in het water opgeloste zouten kunnen scheuren ontstaan. Bij onttrekking van het vocht in het metselwerk uit de lucht door de zouten krijgt het metselwerk niet de kans om goed uit te drogen en leidt dit uiteindelijk tot scheuren.

Indien mogelijk wordt toch de voorkeur gegeven aan herstellmortels met cement als bindmiddel aangezien deze resulteren in een grotere eindsterkte en minder tijd nodig hebben om te verharden. Bastaardmortels op basis van kalkhydraat, ook wel luchtkalk, carbonateren door reactie met koolstofdioxide in de lucht, hetgeen een langdurig proces is. Het gebruik van cementmortels is uiteraard enkel mogelijk wanneer de oorspronkelijke metselmortel ook op basis van cement zijn. [9]

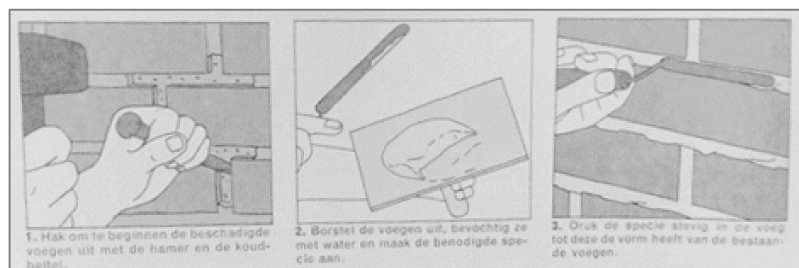
| HERSTELLINGSPRAKTIJK

Wanneer door wind- of watererosie de voegmortel, of erger, de legmortel, weggespoeld wordt, wanneer de stenen los komen te liggen of bij aanwezigheid van ingrijpende schade Fenomenen zijn herstellingswerken noodzakelijk zodat verdere schade door indringend water verder vermeden kan worden. [6]

Zoals voorheen al vermeld dient na te worden gegaan wat de eigenschappen zijn van het beschadigd metselwerk en hoe het deze werd opgebouwd. Indien de oorspronkelijke mortel op basis van kalkhydraat werd vervaardigd, is het aangewezen te controleren of deze voldoende is uitgehard vooraleer na te voegen of een herstellingsmortel aan te brengen. Een te vroeg geplaatste voegmortel zou de carbonatatie van de legmortel vertragen en zou kunnen aanleiding geven tot oplossing van eventueel vrije kalk in capillair water en zou uiteindelijk leiden tot kalkuitloging. [9]

| Voorbereiding en techniek

De te herstellen voegen moeten eerst uniform worden vrijgemaakt met behulp van een koudbeitel, of platte beitel, en hamer. Een zaagsnede van 1.5 tot 2 cm diep wordt in het midden van de beschadigde voeg gemaakt en worden de achtergebleven voegresten boven en onderaan uitgekapt met een steenbeitel. Algemeen genomen wordt uitgekapt tot op een diepte van één tot anderhalf keer de voegbreedte. Bij zoutaantasting of waterschade kan tot driemaal de breedte worden verwijderd. Met een borstel worden de voegen vrijgemaakt van eventuele planten- en mortelresten en resten van eerdere herstellingen zodat de nieuwe mortel goed kan aanhechten. Voordat de herstellings- of restauratiemortel wordt aangebracht dient het beschadigd metselwerk goed bevochtigd te worden zodat het bestaand metselwerk geen vocht onttrekt aan de restauratiemortel en deze verhinderd wordt goed uit te drogen en aan te hechten. Figuur 2.8 [22] verduidelijkt dit principe.



Figuur 2.8| Restauratie van voegen [22]

Wanneer op het metselwerk in het verleden een waterafstotende oppervlaktebehandeling, zoals hydrofobering, werd toegepast is het belangrijk deze volledig te verwijderen teneinde wateropname bij voorbevochtiging mogelijk te maken. De herstellingsmortel dient vol en zat te worden gemetst tijdens de herstellingswerken om een goed contact en aanhechting te verkrijgen met de bestaande legmortel. Algemeen genomen worden eerst de lintvoegen en daarna de stootvoegen van boven naar beneden toe hervoegd. Dit is echter afhankelijk van het voegtype. Zo worden bij geknipte voegen, gesneden voegen en schaduwvoegen eerst de stootvoegen gevoegd. [9] [11] [12] [22]

| Voorzorgsmaatregelen

Renovatiemortels op basis van luchtkalk en traskalk carbonateren bij aanwezigheid van water en koolstofdioxide uit de lucht. Aangezien dit een langzaam proces is het aangewezen het metselwerk te beschermen tegen wind, water en zon. Door het metselwerk en de steigers af te zeilen wordt te snelle uitdroging en uitspoeling van de voegmortel vermeden. Bevochtiging van het metselwerk blijft echter aangewezen. Wanneer een voeg te snel zou uitdrogen, hetgeen

aangemoedigd wordt door wind en warmte, zou de mortel verbranden en verpulveren. Bijgevolg vermindert de aanhechting van de mortel en gaat de kwaliteit van de voeg tot bijna 50% achteruit. [11]

Wanneer er wordt gereinigd met een waterstraal dient rekening gehouden te worden met eventuele verontreinigende stoffen en met het feit dat de oppervlaktelaag zo wordt weggespoeld. Deze laag is een kleine verdichting op het gevelwerk dat vuilafzetting en wateropname vermindert. Wanneer de gevel wordt gereinigd wordt deze mee weggespoeld. De gevel wordt ruwer waardoor, door het groter contactoppervlak, water en vuil sneller worden opgenomen en afgezet. [6]

| Omstandigheden

De randcondities tijdens het herstelwerk bepalen veel van de uiteindelijke kwaliteiten van de herstelling. De ideale randcondities vormen zich wanneer de temperatuur tussen de 5 en 20 graden Celsius bevindt. Weinig wind en regen zorgen ervoor dat het metselwerk op een natuurlijke manier kan uitharden. Bij ongunstige weersomstandigheden zal het metselwerk te snel uitharden hetgeen resulteert in verminderde hechting en samenhang. Wanneer het metselwerk toch wordt blootgesteld aan hoge temperaturen, en het aanmaakwater onttrokken wordt, dient er na bevochtigd te worden. Poreuzere mortels (hydraulische kalkmortel en trasmortel) en mortels op basis van hoogovencement vergen een langere nabevochtigingsperiode dan bastaard- en cementmortels, en mortels gebonden met portlandcement. Ook wanneer een waterfilm zich vormt op een weinig poreus oppervlak blijft nabevochtiging aangewezen. Te lage temperaturen resulteren daarentegen in vochtschade. Gestagneerd en capillair vocht kan bevriezen en uitzetten bij vorst hetgeen resulteert in scheuren. Dit fenomeen is het meest uitgesproken bij poreuzere (kalk)mortels.

| Nabehandeling

Eventuele oppervlaktebescherming kan overwogen worden. Hydrofobering vormt een waterafstotende laag over de gevel en zal zo de waterindringing beperken. Het metselwerk kan evenwel minder goed uitdrogen ten gevolge van de waterdichte film. Het spreekt voor zich dat oppervlaktebescherming geen oplossing biedt voor opstijgend vocht via de grondlaag. Andere beschermingstechnieken, zoals sausen met kalkmelk, houden dezelfde problemen in inzake de vochthuishouding. Schilderen met een dampopen verfssysteem kan een oplossing bieden.

1.5.3 | ONDERHOUD

Een regelmatig onderhoud en controle van het metselwerk voorkomt in vele gevallen schade en ingrijpende herstellingswerken. Zo zijn er enkele eenvoudige controles die schade kunnen voorkomen.

| SCHADE CONTROLEREN

Mechanische schadevormen zijn het eenvoudigst te controleren. Scheurimeters zijn een eenvoudig instrument om constructieve problemen en thermische werking aan te tonen. Twee latjes in metaal of kunststof worden loodrecht op elkaar aan het gevelwerk bevestigd. De positie van beide latjes ten opzichte van elkaar toont de bewegingen van het metselwerk in de tijd aan. Cyclische bewegingen wijzen op thermische werking. Wanneer de scheurimeters langzaam verplaatsen ten opzichte van elkaar toont dat een langzame vervorming in het metselwerk aan. Plastische mortels kunnen dit voor een deel opvangen, een cementmortel is daarentegen te weinig plastisch en zal bezwijken. Wanneer plotse verplaatsingen worden aangetoond door de scheurimeters is het belangrijk de oorzaak op te sporen en de bewegingen te stabiliseren aangezien mortels niet in staat zijn plotse vervormingen in het metselwerk op te vangen.

Chemische schade is niet te voorkomen aangezien agressieve stoffen aanwezig zijn in de lucht. Processen zoals de verbranding van fossiele brandstof creëren agressieve reactieproducten en nefaste oxides. Deze komen via de lucht in contact in met het metselwerk. Verkleuring en vervuiling zijn bijgevolg niet te vermijden. Zolang het vochtevenwicht in het metselwerk niet gewijzigd wordt zijn er geen verdere herstellingen of onderhoud vereist.

Biologische schadefenomenen kunnen vermeden tijdens de ontwerpfase. Wanneer details foutief gedimensioneerd of ontworpen werden, of er geen rekening is gehouden met de ondergrond zal het vochtig metselwerk extra gevoelig zijn voor mossen en algen. Deze worden best zo snel mogelijk verwijderd aangezien de begroeiing het water vasthoudt in de mortel. Daarnaast moet verhouting van kleine plantjes te allen tijde vermeden worden aangezien wortels zich in de voegen wringen en scheuren veroorzaken. Daarnaast vormen de wortels van de begroeiing zuren in het metselwerk hetgeen het bindmiddel van de voeg- of legmortel aantast en doet verweren.

Eventuele waterlekken kunnen opgespoord worden met een infraroodcamera. Via kleurtesten kan de oorzaak van lekkages gevonden worden. In het geval van historisch metselwerk is een goede regenwaterafvoer niet altijd mogelijk, een juiste herstelmortel kan dan een deel van de water- en vochtschade verhelpen. Kalkgebonden mortel met

hydraulische eigenschappen vormt bijvoorbeeld een goede mortel voor vochtbelast metselwerk. Dankzij de hoge porositeit wordt het vochttransport niet belemmerd zoals bij een cementmortel en kan het metselwerk voldoende uitdrogen. [6] [11]

| ONDERHOUD VAN HET METSELWERK

In tegenstelling tot bovenstaande controles zijn sommige onderhoud acties nefast voor het metselwerk. Het regelmatig schoonmaken van een gevel doet zo vaker kwaad dan goed. Eventueel zoutzuur in het schoonmaakproduct kan, na het naspoelen van de gevel, sporen in het metselwerk nalaten. Omzetting van deze resten in zouten kan leiden tot zoutaantastingen en een snellere verwerking van het metselwerk. Zandstraling is nefast voor de gevel aangezien deze het water de muur instuwt. Stoomreinigen met aangepaste druk en heet water vormt een waardig alternatief. Op die manier wordt slechts de toplaag gereinigd en blijft het patina van de steen volledig behouden. [11]

Sommige schadefenomenen, zoals wind- en watererosie, zijn echter zowel onvermijdelijk als schadelijk voor het metselwerk. Regelmatige controle, monitoring, een juiste evaluatie bij schadesymptomen en een vroegtijdige stabiliteitsingreep voorkomen veelal verdere schade en vermijden globale herstellingswerken na enige tijd. [6]

PARAGRAAF 2: BOUWFYSICA

1 | WARMTE-TRANSPORT IN GEBOUWEN

2 | VOCHTTRANSPORT IN GEBOUWEN

3 | GEKOPPELD WARMTE- EN VOCHTTRANSPORT

Het hygrothermisch gedrag van poreuze materialen wordt bepaald door de verschillende aanwezige vormen van warmte- en vochttransport. Deze verschillende transportmechanismen worden toegelicht in deze paragraaf.

2.1| WARMTETRANSPORT IN GEBOUWEN

De warmteoverdracht tussen twee systemen wordt bepaald door het al dan niet aanwezige thermisch evenwicht tussen beide systemen. Een thermisch evenwicht tussen beide systemen doet zich voor wanneer de temperatuur van beide systemen gelijk is en er zo geen netto warmtetransport optreedt. Wanneer er zich toch een temperatuurverschil zou voordoen, zal er overdracht van voelbare warmte tussen beide lichamen plaatsvinden. Dit kan zich voordoen via drie mogelijke mechanismes. Conductie, of geleiding, binnenin een object of tussen twee rakende objecten. Convection via de stroming van een fluïdum. Of straling, de warmteoverdracht via elektromagnetische straling tussen twee systemen. Overdracht van latente warmte treedt op bij vochttransport wanneer deze gepaard gaat met een toestandsverandering. [4] [23]

2.1.1| VORMEN VAN WARMTE-OVERDRACHT IN GEBOUWEN

Het voelbare warmtetransport in bouwconstructies is een combinatie van convection en straling tussen de buitenomgeving en de constructie zelf. Beide vormen van warmtetransport zijn afhankelijk van de warmte-overgangscoefficiënt, α , en het temperatuurverschil tussen de omgeving en het oppervlak van de constructie:

$$q = \alpha \cdot (\theta_{ref} - \theta_{si}) \quad (2.1)$$

Waarbij

q de warmtestroomdichtheid of warmteflux [W/m^2],

α de warmte-overgangscoefficiënt [W/m^2K],

θ_{ref} de temperatuur van de omgeving [K of $^{\circ}C$],

θ_{si} de oppervlaktetemperatuur van het bouwconstructie-oppervlak [K of $^{\circ}C$].

Transport van latente warmte treedt op wanneer er bij vochttransport doorheen een bouwconstructie ook een toestandsverandering plaats vindt. Bij de toestandsverandering van vocht in de bouwconstructie kan er latente warmte vrijkomen, in het geval van stollen of condenseren, of latente warmte onttrokken worden, bij smelten of verdampen. De warmteflux van latente warmte is afhankelijk met de massastroomdichtheid van het vocht en met de latente warmte die vrijkomt of onttrokken wordt bij de toestandsverandering van het vocht:

$$q = g \cdot h \quad (2.2)$$

Waarbij

q de warmtestroomdichtheid of warmteflux [W/m^2],

g de massastroomdichtheid van het vocht [kg/m^2s],

h de vrijgekomen of onttrokken latente warmte [J/kg].

Aangezien de waardes voor de latente warmte relatief groot zijn, valt het transport van latente warmte doorheen bouwconstructies niet te onderschatten op het hygrothermisch gedrag ervan. [23] [24]

2.1.2| GELEIDING - CONDUCTIE

Wanneer er, op atomaire schaal, een temperatuurverschil ontstaat in een materiaal, zal er een verschil ontstaan in trillingsenergie van de atomen. Atomen op een hogere temperatuur zullen meer kinetische energie bevatten en bijgevolg in grotere mate trillen dan deze op een lagere temperatuur. Atomen met een grotere trillingsenergie zullen botsen tegen deze met een kleinere trillingsenergie en zullen op die manier een deel van hun kinetische energie overdragen. Dit gebeurt totdat de kinetische energie de atomen op lagere temperatuur bereikt heeft. Metalen kunnen volgens hetzelfde principe energie overdragen via de aanwezige vrije elektronen. Op deze manier wordt warmte overgedragen van een warme regio naar een regio op lagere temperatuur. Dit principe wordt geleiding of convection genoemd. [23]

| WETTEN VAN FOURIER

Een gebouw of gebouw constructie kan beschouwd worden als een gesloten systeem waar verschillende warmte- en arbeidsstromen op in werken. Op deze manier verandert de inwendige energie, U . Daaruit kan de wet op behoud van energie afgeleid worden, die de basis vormt voor de wetten van warmteoverdracht in gebouwen en constructies.

$$\Sigma \Phi + \Sigma \Psi = \frac{dU}{dt} \quad (2.3)$$

Waarbij

- $\Sigma \Phi$ de inwerkende warmtestromen [W],
- $\Sigma \Psi$ de inwerkende arbeidsstromen [W],
- U de inwendige energie van het systeem [J].

Uit de wet van behoud van energie en uit experimenteel onderzoek blijkt dat de warmteflux door geleiding binnenin een lichaam, of tussen twee rakende lichamen, recht evenredig is met de temperatuurgradiënt over het lichaam. De eerste wet van Fourier drukt dit verband uit:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.4)$$

Waarbij

- q de warmtestroomdichtheid of warmteflux via geleiding [W/m²],
- λ de warmtegeleidingscoëfficiënt van het materiaal [W/mK],
- $\frac{\partial T}{\partial x}$ de temperatuurgradiënt over het systeem [W].

Het minteken wijst op de tegengestelde stromingsrichting van de warmtestroom en temperatuurgradiënt.

De warmtegeleidingscoëfficiënt van een materiaal drukt uit in welke mate het materiaal de warmte geleidt en wordt experimenteel bepaald. De coëfficiënt is sterk afhankelijk van de randcondities waarin ze experimenteel bepaald wordt (temperatuur, ouderdom en vochtgehalte). Materialen met een lage warmtegeleidingscoëfficiënt isoleren de warmte goed, materialen met een hoge warmtegeleidingscoëfficiënt zijn warmtegeleiders. Op die manier wordt bij het isoleren van een bouwconstructie best gekozen voor een isolatiemateriaal met een lage warmtegeleidingscoëfficiënt.

Uit de toepassing van de wet van behoud van energie, op een gedefinieerd deel van een gebouwconstructie, en uit de eerste wet van Fourier kan de tweede wet van Fourier afgeleid worden. Deze wet laat toe uit de netto warmtegeleiding en de inwendige warmteproductie de thermische traagheid van een systeem te berekenen. De thermische traagheid drukt uit hoe snel een wijziging van de warmtestromen een temperatuurswijziging tot gevolg heeft. [4] [24]

| STATIONAIRE WARMTEGELEIDING DOORHEEN EEN VLAKE WAND

Een historische massieve wand zou, in het belang van het beter verstaan van de warmtegeleiding er doorheen, eenvoudigweg als een enkelvoudige wand kunnen beschouwd worden. Wanneer over een materiaal of systeem (in dit geval een enkelvoudige wand) een temperatuurverschil ontstaat tussen het buitenoppervlak en binnenoppervlak, zal warmtetransport door middel van geleiding plaatsvinden. Een warmteflux ontstaat van een punt of regio met een hogere temperatuur naar een punt of regio met een lagere temperatuur. Op die manier zal de stromingsrichting van een warmteflux en temperatuurgradiënt altijd tegengesteld zijn, zoals in vergelijking (2.4) uitgedrukt. De warmteflux doorheen de enkelvoudige wand kan uitgedrukt worden als:

$$q = \frac{\lambda}{d} \cdot (\theta_h - \theta_c) = (\theta_h - \theta_c) \cdot \frac{1}{R} \quad (2.5)$$

Waarbij

- q de warmtestroomdichtheid of warmteflux via geleiding [W/m²],
- λ de warmtegeleidingscoëfficiënt van het materiaal [W/mK],
- d de dikte van de enkelvoudige wand [m],
- θ_h de temperatuur van het warmste punt of regio [K of °C],
- θ_c de temperatuur van het koudste punt of regio [K of °C],
- R de warmteweerstand van de enkelvoudige wand [m²K/W].

De warmteweerstand, R , van een materiaal wordt bepaald uit de verhouding van de dikte van de laag en de warmtegeleidingscoëfficiënt van de laag. Wanneer de wand zou bestaan uit verschillende lagen, i.e. een samengestelde wand, wordt de warmteweerstand bepaald door het sommeren van de warmteweerstand tegen geleiding van de afzonderlijke lagen en de warmteweerstand tegen convectie en straling van het buitenoppervlak naar de buitenomgeving en van het binnenoppervlak naar de binnenomgeving: [4] [23] [24] [25]

$$R_{\text{tot}} = \Sigma_n(R_i) = R_{\text{se}} + R_1 + R_2 + \dots + R_{\text{si}} \quad (2.6)$$

Waarbij

- R_{se} de warmteweerstand van het buitenoppervlak, bepaald in EN 9646 [25][m²K/W],
- R_{si} de warmteweerstand van het binnenoppervlak EN 9646 [25][m²K/W],
- $R_1, R_2, \dots$ de warmteweerstanden van de verschillende lagen van de samengestelde wand [m²K/W].

2.1.2| CONVECTIE

Wanneer de warmteoverdracht het gevolg is van de verplaatsing van fluïda, is er sprake van convectie. In de bouwkunde zijn deze fluïda voornamelijk lucht en water. Convectie kan natuurlijk, door een verschil in densiteit in het fluïdum, ten gevolge van een temperatuurgradiënt, of gedwongen, met behulp van een pomp, gebeuren. Volgens de geometrie waarin de stroming van het fluïdum plaatsvindt, kan convectie onderscheiden worden in uitwendige stromingen en inwendige stromingen van het fluïdum. Dit verschil in geometrie bepaalt de formules waarmee de warmtestroomdichtheid, q_c , kan berekend worden.

| UITWENDIGE STROMING

Wanneer er geen afgebakend stromingskanaal is gedefinieerd, zoals in het geval van warmteoverdracht aan het oppervlak van een bouwconstructie, gebeurt de convectie via uitwendige stroming. In dit geval is de convectieve warmteoverdracht afhankelijk van de warmte-overgangscoefficiënt, α_c , en wordt deze afgeleid uit formule (2.2):

$$q_c = \alpha_c \cdot (\theta_f - \theta_s) \quad (2.7)$$

Waarbij

- q_c de warmtestroomdichtheid of warmte flux via convectie [W/m^2],
- α_c de warmte-overgangscoefficiënt die bepaald worden volgens tabel 2.4 [4] [W/m^2K],
- θ_f de temperatuur van het stromend fluïdum [K of $^{\circ}C$],
- θ_s de oppervlaktetemperatuur van het materiaaloppervlak waarlangs een fluïdum stroomt [K of $^{\circ}C$].

Aangezien de stromingssnelheid v van het fluïdum ter plaatse van het materiaaloppervlak gelijk aan 0 is ten gevolge van wrijvingskrachten, volgt de warmtestroomdichtheid aan het oppervlak de wet van Fourier:

$$q_c = \alpha_c \cdot (\theta_f - \theta_s) = -\lambda_f \cdot \text{grad}(\theta)|_s \quad (2.8)$$

Waarbij

- λ_f de warmtegeleidingscoëfficiënt van het materiaal [W/mK],
- $\text{grad}(\theta)|_s$ de temperatuurgradiënt over het materiaaloppervlak [K/m].

Bijgevolg blijkt dat de convectieve warmteoverdracht afhankelijk is van de afmetingen van de grenslaag (waar de stromingssnelheid 0 is) aan het materiaaloppervlak. Dit verband ligt, samen met andere empirische en experimentele verbanden, aan de grondslag van de waardebepaling van de warmte-overgangscoefficiënt. Tabel 2.4 [4] geeft enkele praktische waarden van de warmte-overgangscoefficiënten afhankelijk van de geometrie van het constructie-oppervlak.

Tabel 2.4| Warmte-overgangscoefficiënt [4]

Kenmerken constructie-oppervlak	α_c (W/m^2K)
BINNEN	
- Verticaal oppervlak	2.5
- Horizontaal oppervlak met warmtetransport naar boven	5.0
- Horizontaal oppervlak met warmtetransport naar onder	0.7
BUITEN	20
	of $4+4 \cdot v_{\text{met}}$

Met v_{met} de meteorologische windsnelheid (m/s) (in België gemiddeld 4 m/s)

| INWENDIGE STROMING

Van inwendige stroming is er sprake als het fluïdum in een afgebakend stromingskanaal stroomt, zoals in het geval van een warm-waterleiding. Deze stroming van fluïda gaat ook gepaard met het transport van opgeslagen voelbare warmte (enthalpie) en veroorzaakt op die manier een temperatuursverandering:

$$q_c = v \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot \theta_f = g_f \cdot c_f \cdot \theta_f \quad (2.9)$$

Waarbij

- q_c de warmtestroomdichtheid of warmte flux via convectie [W/m^2],
- v de stromingssnelheid van het fluïdum [m/s],
- ρ_f de densiteit van het fluïdum [kg/m^3],
- g_f de massastroomdichtheid [kg/m^2s],
- c_f de soortelijke warmtecapaciteit van het fluïdum [J/kgK],
- θ_f de temperatuur van het stromend fluïdum [K of $^{\circ}C$].

De stationaire warmtestroom die wordt toegevoegd aan een lichaam op constante temperatuur ten gevolge van de fluïdumstroming, is het verschil tussen de aangevoerde en afgevoerde warmte aan het gebouw: [4] [23]

$$\Phi_c = \Phi_{in} - \Phi_{uit} = G \cdot c_f \cdot (\theta_e - \theta_i) \quad (2.10)$$

Waarbij

Φ_{in} de aangevoerde warmtestroom [W],

Φ_{uit} de afgevoerde warmtestroom [W],

G massadebiet [kg/s],

c_f de soortelijke warmtecapaciteit van het fluïdum [J/kgK],

θ_e de temperatuur van het aangevoerd fluïdum [K of °C],

θ_i de temperatuur van het afgevoerd fluïdum [K of °C].

2.1.3 | STRALING

Straling is de warmteoverdracht door elektromagnetische golven (zichtbaar licht, IR- en UV-straling) uitgestraald door objecten. Deze vorm van warmtetransport kan, in tegenstelling tot convectie en conductie, ook doorgaan in vacuüm. Bij een materiaaloppervlak op kamertemperatuur zal het merendeel van de energie door infraroodgolven worden overgedragen. Wanneer de temperatuur stijgt, zullen de golflengtes verkleinen, en kan de energie gedragen worden door zichtbaar licht of zelfs ultravioletstraling. De hoeveelheid energiestraling van een oppervlakte is bijgevolg evenredig met afmetingen van het oppervlak en met de temperatuur ervan.

De warmtestroomdichtheid via straling kan uitgedrukt worden door middel van een referentietemperatuur. De binnen- of buitenomgeving wordt voorgesteld als een isotherme zwarte straler (een oppervlak met ideale stralingseigenschappen) met referentie stralingstemperatuur T_r . De warmtestroomdichtheid kan zo vereenvoudigd bepaald worden in functie van de referentietemperatuur, de temperatuur van het oppervlak en de aard van het materiaal:

$$q_r = e_s \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_r^4) \quad (2.11)$$

Waarbij

q_r de warmtestroomdichtheid of warmte flux via straling [W/m²],

e_s de emissiviteit van het materiaal [-],

σ de constante van Boltzmann [W/m²K⁴],

T_s^4 de temperatuur van het constructie-oppervlak [K],

T_r^4 de referentie-stralingstemperatuur [K].

De emissiviteit, e , is afhankelijk van de aard van het materiaal en is een dimensieloos getal tussen 0 en 1. De emissiviteit wordt bepaald als de verhouding tussen de werkelijk uitgestraalde energie en de zwarte straler referentie-energie. De emissiviteit van een zwarte straler is bijgevolg gelijk aan 1. De meeste bouwmaterialen hebben een emissiviteit tussen 0.8 en 0.95. [4] De constante van Boltzmann is een fundamenteel fysische constante en kan benaderd worden met: [23]

$$\sigma = 5.670400 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \quad (2.12)$$

Wanneer formule (2.11) ontbonden wordt en randvoorwaarden toegepast worden, kan deze, volgens de koelingswet van Newton, praktisch geschreven worden in functie van een warmte-overgangscoefficiënt voor straling: [4] [23]

$$q_r = \alpha_r \cdot (\theta_s - \theta_r) \quad (2.13)$$

Waarbij

q_r de warmtestroomdichtheid of warmte flux via straling [W/m²],

α_r $5.67e \cdot f_r$, de warmte-overgangscoefficiënt voor straling [W/m²K],

e_s de emissiviteit van het materiaal [-],

f_r de temperatuurcorrectiefactor [-],

θ_s de temperatuur van het constructie-oppervlak [K],

θ_r de referentie-stralingstemperatuur van de omgeving [K].

2.2 | VOCHTTRANSPORT IN GEBOUWEN

Het vochttransport in gebouwen kan analoog worden beschouwd worden als het warmtetransport in gebouwen aangezien dit ook een massatransport betreft. Formule (2.3), de wet op behoud van energie, vormt de basis van het warmtetransport. Analoog kan voor het vochttransport in gebouwen de wet op behoud van massa bepaald worden: [23]

$$\Sigma G + \Sigma G_p = \frac{dm}{dt} \quad (2.14)$$

Waarbij

ΣG de massaproductie [W],

ΣG_p de netto instroom van het systeem [W],

m de opgeslagen massa van het systeem [J].

2.2.1 | VORMEN VAN VOCHTTRANSPORT IN GEBOUWEN

Afhankelijk van de vorm waarin het vocht zich voordoet, waterdamp of stromend water, kunnen er zich verschillende vormen van vochttransport voordoen. Analooq aan het warmtetransport kan het vocht zich diffusief, ten gevolge van verschillende dampconcentraties, of convectief, ten gevolge van luchtdrukverschillen, verplaatsen. Daarnaast kan het vocht zich capillair, door stroming van water, of via drukstroming, door een drukverschil, verplaatsen.

Wanneer er zich tijdens het transport een toestandsverandering van het vocht plaats vindt zal dit een impact hebben op het warmtetransport in de bouwconstructie (zie Hoofdstuk 2, paragraaf 2.1). Door de temperatuurschommelingen waaraan de constructie onderworpen is, kan waterdamp condenseren of water bevriezen. Indien het vocht een toestandsverandering ondergaat, zal er latente warmte vrijkomen of onttrokken worden. De warmteflux van deze latente warmte wordt bepaald volgens formule (2.2).

In dit deel zal het diffusieproces van waterdamp, van belang voor het vormen van condensatie en het drogen van bouwconstructies, en het capillair watertransport, een proces dat plaats vindt bij het opzuigen van water en condensatie, verder worden uitgelegd. Convectief waterdamptransport loopt analoog als convectief warmtetransport en wordt geïnitieerd door een luchtdrukverschil. Ook hier kunnen, zowel voor uitwendige als inwendige stroming, analoge formules aan formules (2.8) en (2.9) opgesteld worden. Op convectief waterdamptransport zal niet verder ingegaan worden, aangezien het minder relevant is voor het verdere onderzoek (zie Hoofdstukken 6 en 7). Ook drukstroming, waarbij water onder druk wordt getransporteerd, en volledig beschreven wordt volgens de hydraulica, is minder relevant voor het verdere onderzoek en wordt bijgevolg niet verder besproken in deze thesis.

2.2.2 | DIFFUSIE VAN WATERDAMP

| TOESTANDEN VAN VOCHTIGE LUCHT

| Gaswet

In de bouwfysica wordt lucht als een mengsel van twee inerte en ideale gassen beschouwd. Beide gassen, waterdamp enerzijds en droge lucht anderzijds, worden gelijkwaardig in volume en in thermisch evenwicht beschouwd. Aangezien beide gassen als ideaal worden beschouwd, waarbij de droge lucht als verzameling van de overige gassen in de lucht wordt beschreven, geldt de ideale gaswet voor zowel de beide gassen als voor het mengsel van beide:

$$p_v \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (2.15)$$

Waarbij

p_v de partiële dampdruk [Pa],

V het volume luchtmengsel [m^3],

m de massa waterdamp in het luchtmengsel [kg],

R de gasconstante voor waterdamp [462 J/kg.K],

T de temperatuur van het luchtmengsel [K].

Bovenstaande formule (2.15) geldt voor waterdamp in het mengsel en kan analoog opgesteld worden voor droge lucht. Aangezien beide gassen inert worden beschouwd, is de wet van Dalton ook van toepassing. Deze stelt dat de totale druk van een gasmengsel gelijk is aan de som van de partiële gasdrukken:

$$p_a = p_d + p_v \quad (2.16)$$

Waarbij

p_a de totale druk van het luchtmengsel: de luchtdruk [Pa],

p_d de druk van droge lucht [Pa],

p_v de partiële dampdruk [Pa].

In bouwconstructies worden de luchtdruk constant beschouwd. Hierdoor kan, na combinatie van gaswetten voor beide inerte gassen, de waterdampdruk gebruikt worden om de vochtinhoud van de lucht te beschrijven. [4]

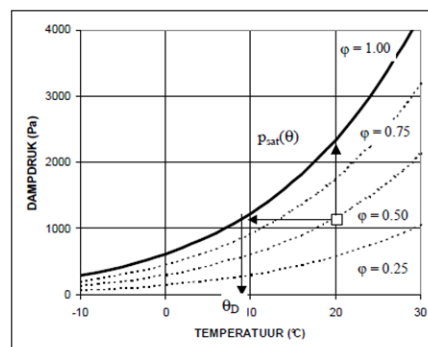
| Verzadiging

De verzadigingswaarde, het punt waarop de maximale hoeveelheid waterdamp die in de lucht kan worden opgenomen is bereikt, is afhankelijk van de massa waterdamp en de temperatuur. In bouwfysische toepassingen wordt echter beschouwd dat de verzadigingswaarde enkel afhankelijk is van de temperatuur van het luchtmengsel, en wordt dit genoteerd als $p_{\text{sat}}(\theta)$. In TVN 153 wordt een tabel aangereikt waarop de verzadigingsdampdruk kan worden afgelezen in functie van de temperatuur. Hoe hoger de temperatuur van de lucht, hoe hoger de verzadigingsdampdruk en bijgevolg hoe meer waterdamp kan worden opgenomen in de lucht. Dit wordt ook aangetoond met de ideale gaswet. [26]

Figuur 2.9 [4] toont de verzadigingscurve voor waterdamp. De curve toont aan dat dampconcentraties boven de verzadigingslijn, $p_{\text{sat}}(\theta)$, fysisch onmogelijk zijn. Saturatie, of verzadiging, kan bereikt worden via isotherme bevochtiging of via isobare afkoeling. Beide principes kunnen worden verduidelijkt aan de hand van de figuur.

Bij isotherme bevochtiging wordt, vertrekkende van het vierkantje bij een temperatuur van 20°C, op isotherme wijze waterdamp toegevoegd (op de grafiek verduidelijkt met een verticale pijl). Wanneer de verzadigingscurve, $p_{\text{sat}}(\theta)$, is bereikt, is de lucht verzadigd. Wanneer na dit punt nog waterdamp wordt toegevoegd, zal de lucht condenseren (water wordt gevormd uit het overtollige waterdamp). Het omgekeerde proces is het verdampen van water tot waterdamp.

In het geval van isobare afkoeling wordt, opnieuw vertrekkende van het vierkantje bij een temperatuur van 20°C, op isobare wijze gekoeld (op de grafiek verduidelijkt met een horizontale pijl). Wanneer nu de verzadigingscurve, $p_{\text{sat}}(\theta)$, bereikt wordt, is de lucht opnieuw verzadigd. Dit punt wordt als de dauwtemperatuur of dauwpunt, θ_d , van de lucht bepaald. Wanneer er na dit punt nog verder wordt afgekoeld, zal de lucht verder afkoelen langsheen de verzadigingscurve. Op de figuur is te zien dat het dauwpunt onafhankelijk is van de temperatuur en enkel wordt bepaald door de dampdruk van de lucht. [4] [26]



Figuur 2.9| Verzadigingscurve waterdamp [4]

| Relatieve vochtigheid

De relatieve vochtigheid van de lucht geeft de relatie van de vochtigheid van de lucht op een bepaalde temperatuur ten opzichte van de verzadigingswaarde van de lucht bij die temperatuur. Figuur 2.9 [4] toont aan dat bij eenzelfde dampdruk de lucht verschillende relatieve vochtigheden kan hebben, afhankelijk van de temperatuur. De verzadigingscurve, $p_{\text{sat}}(\theta)$, is de curve waarvoor de relatieve vochtigheid 100% bedraagt:

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{\text{sat}}(\theta)} \cdot 100\% \quad (2.17)$$

Waarbij

φ de relatieve vochtigheid van de lucht [-],

p_v de partiële dampdruk [Pa].

$p_{\text{sat}}(\theta)$ de dampdruk bij verzadiging, i.e. de maximale dampdruk [Pa].

De relatieve vochtigheid kan, analoog aan formule (2.17), ook als een verhouding van dampdrukconcentraties worden uitgedrukt. Op die manier wordt de relatieve vochtigheid bepaald als de werkelijke concentratie van de waterdamp in de lucht ten opzichte van de maximaal mogelijke waterdampconcentratie.

De toestand van de lucht kan volledig bepaald worden wanneer een veranderlijk met betrekking tot de waterdamphoeveelheid in de lucht (p_v , φ , θ_d of de werkelijke dampconcentratie) en een veranderlijke met betrekking tot de verzadiging van de lucht (p_{sat} , φ , of θ) gekend is.

Er kan ook gebruik gemaakt worden van de waterdampverhouding x [kg/kg] en de enthalpie van vochtige lucht h [J/kg] om de toestand van de vochtige lucht te bepalen. De waterdampverhouding is de verhouding van de massa beide ideale gascomponenten in het luchtmengsel ten opzichte van elkaar. De enthalpie van de vochtige lucht geeft weer wat de warmte-inhoud (zowel voelbare als latente warmte) is van de vochtige lucht. Doordat deze zowel afhankelijk is van

voelbare als latente warmte, wijzigt de enthalpie van de lucht zowel bij een temperatuurschommeling als bij een verandering in de dampverhouding. [4]

| DAMPDIFFUSIE IN POREUZE MATERIALEN

Het diffusieproces voor waterdamp is gelijkaardig aan dat voor convectief warmtetransport. Wanneer er een verschil is in waterdampconcentraties tussen twee rakende systemen of binnenin een systeem, zal vocht getransporteerd worden door middel van diffusie. Dit verschil in concentraties wordt geïnitieerd door een verschil in temperatuur of verschil in relatieve vochtigheid. Een waterdampstroom zal dan ontstaan van de regio met een hogere concentratie aan waterdamp in de lucht naar een regio met een lagere concentratie. Dit gaat door totdat het systeem terug in evenwicht is (wanneer de concentratie aan waterdamp over beide systemen terug gelijk is).

De massaflux aan waterdamp tussen twee regio's of systemen kan worden uitgedrukt volgens het verschil in dampdruk tussen beide regio's of systemen en hun weerstand tegen diffusie. De wet van Fick stelt dat een massaflux doorheen een materiaal evenredig is met de dampdrukgradiënt en de dampgeleidingscoëfficiënt van het materiaal: [4]

$$g_v = -\delta \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (2.18)$$

Waarbij

g_v de massaflux aan waterdamp door diffusie [$\text{kg/m}^2\text{s}$],

δ de dampgeleidingscoëfficiënt of damppermeabiliteit van het materiaal [s],

$\frac{\partial p_v}{\partial x}$ de dampdrukgradiënt [$\text{kg/m}^2\text{s}^2$].

De dampgeleidingscoëfficiënt is afhankelijk van de porositeit van het materiaal. Hoe poreuzer het materiaal, hoe gemakkelijker de waterdampmoleculen kunnen diffunderen doorheen het poriënnetwerk van het materiaal. De porositeit van stilstaande lucht bedraagt 1. Op die manier heeft lucht de maximaal mogelijke damppermeabiliteit van materialen. Ten einde de damppermeabiliteit van verschillende materialen op een eenvoudige manier te kunnen vergelijken wordt er gebruik gemaakt van het diffusieweerstandsgetal μ . Met dit getal wordt de werkelijke damppermeabiliteit van het materiaal vergeleken met de referentie damppermeabiliteit van stilstaande lucht ($2 \cdot 10^{-10}$ s):

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (2.19)$$

Waarbij

μ het diffusieweerstandsgetal [-],

δ_a de dampgeleidingscoëfficiënt van stilstaande lucht [$2 \cdot 10^{-10}$ s],

δ de dampgeleidingscoëfficiënt van het materiaal [s].

Formule (2.19) toont aan dat materialen minimaal een diffusieweerstandsgetal van 1 hebben. Materialen met een betrekkelijk laag diffusieweerstandsgetal (1-10) zijn dampdoorlatend. Materialen met een hoog diffusieweerstandsgetal (100) worden dampdicht beschouwd. Zo worden de diffusieweerstandsgetalen van glas en metaal, bij een relatieve vochtigheid van 50%, oneindig beschouwd. Beton heeft een μ -waarde van 100 en wordt relatief dampdicht beschouwd. Poreuze materialen zoals baksteen (10-20) en isolatiematerialen (minerale wol: 2) worden dampopen beschouwd.

De diffusieweerstand van mortels is afhankelijk van de samenstelling, al worden ze over het algemeen dampopen beschouwd. Tabel 2.5 geeft een kort overzicht van enkele beschikbare diffusieweerstandsgetalen¹. Er zou kunnen geconcludeerd worden dat de diffusieweerstandsgetalen van mortel tussen 10 en 30 liggen. Wanneer de mortel is samengesteld uit zowel kalk als cement (bastaardmortel) is het diffusieweerstandsgetal doorgaans van een hogere waarde. Dit is te wijten aan specifieke toeslagstoffen die de dampdichtheid van het materiaal verbeteren. Braeckman et al. stelt in zijn werk 'thermisch en hygrisch gedrag van bouwconstructies' dat cementpleisters een μ -waarde tussen 20 en 40 hebben en kalkpleisters een tussen 10 en 40, hetgeen wordt bevestigd in tabel 2.5. [24]

¹ Delphin Material Database (Bauklimatik, Dresden), WUFI Material Database (Fraunhofer IBP, Valley), KEIM en Cantillana

Tabel 2.5| Diffusieweerstandsggetallen mortel afhankelijk van samenstelling

MORTEL SAMENSTELLING	μ [-]
Hydraulische kalk	
KEIM NHL Kalkputz Fein (witkalk en hydraulische kalk) [KEIM]	ca. 10
KEIM NHL Kalkputz Grob (witkalk en hydraulische kalk) [KEIM]	ca. 10
Clay mortar (historische mortel) [Delphin: TU Dresden]	11.368
Light clay mortar (historische mortel) [Delphin: Baunit]	30
Luchtkakmortel	
KEIM NHL Kalkputz Fein (witkalk en hydraulische kalk) [KEIM]	ca. 10
KEIM NHL Kalkputz Grob (witkalk en hydraulische kalk) [KEIM]	ca. 10
Cementmortel	
AQUAPANEL cement mortar [Delphin: KNAUF]	13.2359
Bastaardmortel	
Granomin KR (kalk en cement) [Cantillana]	30
KEIM POROSAN®-TRASS-CEMENTPUTZ (cement en tras) [KEIM]	< 25
Lime Cement mortar [Delphin: IBK laboratory]	11
SM 700 repair mortar (hydraulische kalk en cement) [WUFI: KNAUF]	31
SM 700 pro repair mortar (hydraulische kalk en cement) [WUFI: KNAUF]	38

| DAMPDIFUSIE DOORHEEN BOUWCONSTRUCTIES

In woningen zal de concentratie aan waterdamp in de lucht binnen groter zijn dan die buiten. Bijgevolg zal de massaflux aan waterdamp van binnen naar buiten gaan. De wandconstructie zal weerstand bieden tegen deze diffusie, hetgeen kan worden uitgedrukt in de diffusieweerstand, Z , van de wand. De diffusieweerstand van de wand is de verhouding tussen de diffusiedikte van de laag en de dampgeleidingscoëfficiënt van de lucht, δ_a ($2 \cdot 10^{-10}$ s). De diffusiedikte, of equivalente luchtlaagdikte van de materiaallaag, is de dikte die een stilstaande luchtlaag zou moeten hebben om een equivalent diffusieweerstandsgetal te hebben: [4]

$$Z = \frac{\mu \cdot d}{\delta_a} \quad (2.20)$$

Waarbij

- Z de diffusieweerstand van een materiaallaag [m/s],
- μ het diffusieweerstandsgetal van de materiaallaag [-],
- d de dikte van de materiaallaag [m],
- $\mu \cdot d$ de diffusiedikte of equivalente luchtlaagdikte van de materiaallaag [m],
- δ_a de dampgeleidingscoëfficiënt van stilstaande lucht [$2 \cdot 10^{-10}$ s].

Het stationair isotherm damptransport doorheen de wand kan uitgedrukt worden met de dampstroomdichtheid g . Deze kan berekend worden uit het dampdrukverschil over de wand heen en de diffusieweerstand Z van de wand:

$$g_v = \frac{p_i - p_e}{Z_{tot}} \quad (2.21)$$

Waarbij

- g_v de massaflux aan waterdamp door diffusie of van binnen naar buiten [$\text{kg/m}^2\text{s}$],
- $p_i - p_e$ het verschil in dampdruk op het binnen- en buitenoppervlak van de wand [Pa],
- Z_{tot} de diffusieweerstand van de wand [m/s].

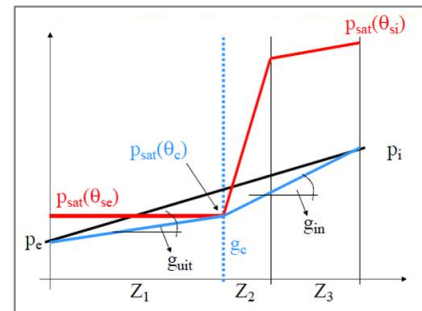
In het geval van een samengestelde wand kan de diffusieweerstand berekend worden uit de sommatie van de diffusieweerstanden van de verschillende materiaallagen van de wand:

$$Z_{tot} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots + Z_n = \sum_{i=1}^n Z_i \quad (2.22)$$

Het bepalen van de diffusieweerstand van een materiaal gebeurt via een isotherme 'cup test'. Het materiaal, met een gekende massa, wordt bovenop een cup met water verzadigde oplossing geplaatst en verzegeld. De oplossing wordt als een vloeistof met 100% relatieve vochtigheid beschouwd. Tijdens de test zal de oplossing verdampen doorheen het materiaal. Door middel van weging van de volledige opstelling kan de evolutie van de verdamping in de tijd uitgezet worden. Wanneer er een trage gewichtsafname wordt gemeten, kan worden gesteld dat het materiaal dampdicht karakter heeft. Bij grote diffusieweerstanden is het echter moeilijk deze nauwkeurig te kunnen bepalen. [27]

In het geval van niet-isotherm damptransport doorheen de wand moet naast de dampdrukgradiënt ook rekening gehouden worden met een temperatuurgadiënt. In dat geval kan de methode van Glaser worden toegepast. Hiervoor

wordt achtereenvolgens het isotherm dampdrukverloop, temperatuursverloop en het verloop van de verzadigingsdruk p_{sat} doorheen de wand uitgezet. Om deze methode fysisch correct te houden, dienen de punten waarop het isotherm dampdrukverloop en de verzadigingslijn elkaar kruisen, aangepast te worden. Het lineair dampdrukverloop dient aangepast te worden zodat deze de verzadigingslijn niet oversnijdt. Op die manier ontstaat er een knik in het dampdrukverloop. De plaats waar de knik zich voordoet vormt het condensatievlak van de constructie. Hier kan de hoeveelheid condensatie berekend worden uit het verschil in helling, voor en na de knik. Het condensatiedebiet kan berekend worden uit het verschil tussen de ingaande massaflux, $g_{\text{v,in}}$, en de uitgaande massaflux, $g_{\text{v,uit}}$, op het condensatievlak. Figuur 2.10 [4] verduidelijkt deze methode voor een, uit drie materiaallagen, samengestelde wand. [4] [26] [27] [28]

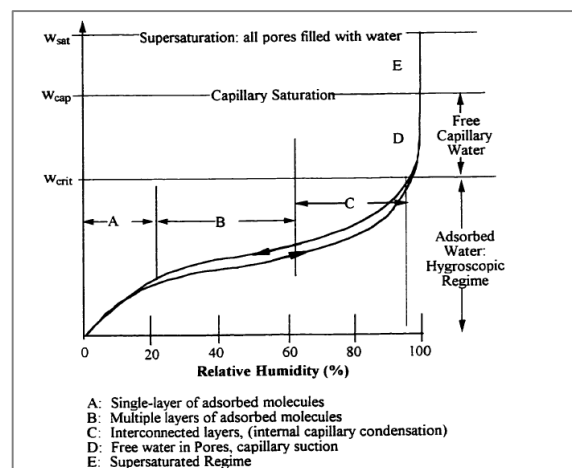


Figuur 2.10| De methode van Glaser [4]

| HYGROSCOPICITEIT VAN POREUZE MATERIALEN

Wanneer poreuze materialen in contact komen met vochtige lucht zal het materiaal vocht aanzuigen totdat het een evenwichtstoestand heeft bereikt. De hoeveelheid aangezogen vocht en het evenwichtsvochtgehalte is afhankelijk van de relatieve vochtigheid van de lucht en wordt het hygroscopisch vochtgehalte van het materiaal genoemd. Dit evenwichtsvochtgehalte zal slechts langzaam variëren bij schommelingen van relatieve vochtigheid van de lucht aangezien waterdampdiffusie een traag proces is.

De reden waardoor poreuze materialen vocht uit de lucht aanzuigen, is het hygroscopisch gedrag van het materiaal en kan uitgezet worden in een hygroscopische curve, getoond door figuur 2.11 [29].

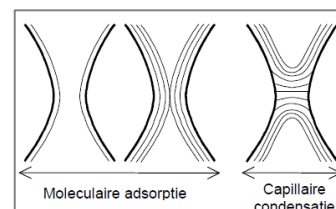


Figuur 2.11| Vochtgehalte in poreuze materialen in functie van RV [29]

Figuur 2.11 [29] geeft het hygroscopisch gedrag van poreuze materialen weer via het verband tussen het vochtgehalte van het materiaal [kg/m^3] en de relatieve vochtigheid van de lucht [%]. De grafiek kan onderverdeeld worden in drie delen. In een eerste deel wordt het hygroscopisch gedrag van het poreus materiaal uitgelegd. Onder lagere relatieve vochtigheid (A-B) neemt het vochtgehalte toe door moleculaire adsorptie. Bij hogere relatieve vochtigheid, tussen 60 en 90%, (C) wordt vochtgehalte opgenomen via capillaire condensatie. Dit hygroscopisch vochtgehalte (A-C) is het minimaal vochtgehalte in een poreus materiaal dat praktisch mogelijk is. In een tweede deel (D) neemt het vochtgehalte toe door middel van capillaire aanzuiging van vrij water in de poriën totdat er capillaire verzadiging optreedt. Op dit moment bedraagt de relatieve vochtigheid 100%. Wanneer, via opgelegde druk in het labo of via waterdampdiffusie, nog verder water wordt aangezogen spreekt men van oververzadiging (E). Dit kan doorgaan totdat alle poriën van het poreus materiaal gevuld zijn met water.

| Moleculaire adsorptie

Door de adhesie tussen de waterdampmoleculen en de poriënwand van het materiaal wordt vocht doorheen de wanden van de materiaalporiën geadsorbeerd. Bij lage relatieve vochtigheden vormen deze geadsorbeerde moleculen een laag (A). Naarmate de relatieve vochtigheid van de lucht stijgt worden meer moleculen via adhesie gebonden aan de poriënwand en vormt zich een dikkere laag aan geadsorbeerde moleculen (B). De mate waarin moleculen zich aan de poriënwand hechten is sterk afhankelijk van de poriënverdeling van het materiaal. Een materiaal met een groter oppervlak aan poriën, dit is voor fijnporeuze materialen, zal meer plaats bieden aan moleculen om zich te hechten en zal bijgevolg meer vocht opnemen dan een materiaal met grotere poriën. Figuur 2.12 [4] geeft dit schematisch weer.



Figuur 2.12| Hygroscopiciteit van poreuze materialen [4]

| Capillaire condensatie

Bij hogere relatieve vochtigheden in de lucht kan er capillaire condensatie optreden in fijne materiaalporiën (C). Ten gevolge van de meerlagige waterdampmoleculen, die zich via adhesie vast hebben gehecht aan de poriënwand, worden de fijnste poriën gevuld met water en maken de geadsorbeerde waterlaagjes op die manier contact. Zo vormt zich een nauw capillair met een holle meniscus waar het capillair overgaat op de groter poriën die nog niet gevuld zijn met water. Figuur 2.12 [4] verduidelijkt dit principe. Door de sterke kromming van dit oppervlak verlaagt de verzadigingsdampdruk lokaal en kan condensatie optreden bij een lagere dampdruk dan op een vlak oppervlak. Op die manier zal vochtige lucht gemakkelijker condenseren aan deze menisci dan aan een vlak oppervlak en zal er zo vocht worden opgenomen in het materiaal. Volgens de wet van Kelvin-Thompson hangt de mate waarin de verzadigingsdampdruk lokaal afneemt af van de kromtestraal van de meniscus en poriëndiameter waarin de meniscus zich vormt. Capillaire condensatie stopt op het moment dat de dampdruk van de lucht gelijk is aan de lokaal verlaagde dampdruk boven de holle watermenisci.

| Capillaire zuiging

Bij het alsmaar toenemen van de relatieve vochtigheid van de lucht worden steeds wijdere poriën opgevuld totdat er capillaire verzadiging optreedt (D). De opzuiging vanaf 90% relatieve vochtigheid gebeurt via capillaire aanzuiging van water.

| Oververzadiging

Onder opgelegde druk, via diffusie of in het labo, kan het materiaal na verzadiging nog verder water opnemen totdat alle poriën gevuld zijn met water. Dit proces gebeurt bij een relatieve vochtigheid van 100%.
[4] [26] [29]

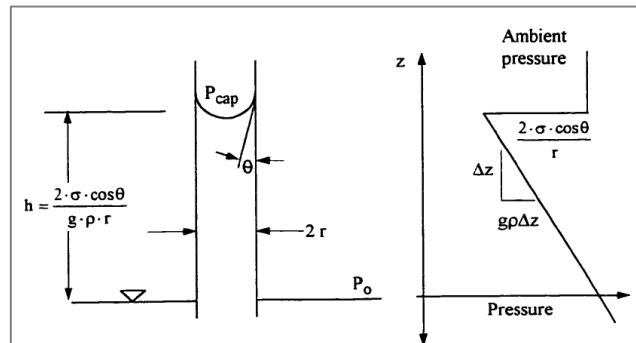
2.2.3| CAPILLAIRE OPZUIGING VAN WATER

Aangezien in een poreus materiaal een netwerk van, al dan niet gevulde, poriën aanwezig is, kan opgenomen vocht zich via dit netwerk gemakkelijk verspreiden doorheen het materiaal. Op het moment dat een poreus materiaal in aanraking komt met water, via condensatie of regeninval, kan water in de poriën gezogen worden via capillaire opzuiging.

| CAPILLAIRE OPZUIGING IN EEN PORIE

Net zoals in het geval van capillair vochttransport van vocht in poreuze materialen (zoals uitgelegd aan de hand van figuur 2.11 [29]) kan capillaire aanzuiging van water in een porie aan de hand van heersende intermoleculaire krachten tussen de watermoleculen en de poriënwand worden uitgelegd.

Wanneer een porie in contact komt met een wateroppervlak, zal door de adhesie tussen de watermoleculen en de poriënwand, water aangetrokken worden in het geval van hydrofiele materialen. Het water zal aangezogen worden door de poriënwand en het waterniveau lokaal optrekken. De hoek waaronder het water wordt aangezogen langsheen de poriënwand wordt de contacthoek θ genoemd. Figuur 2.13 [29] verduidelijkt dit principe.



Figuur 2.13| Capillaire aanzuiging van water [29]

De kracht waarmee het water wordt aangezogen, ofwel de capillaire zuiging, kan worden bepaald uit de oppervlaktespanning van het water, de contacthoek waaronder het water wordt aangezogen aan de wand en de diameter van de porie:

$$p_c = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos(\theta)}{r} = \frac{4 \cdot \sigma \cdot \cos(\theta)}{d} \quad (2.23)$$

Waarbij

- p_c de capillaire zuiging [Pa],
- σ de oppervlaktespanning water [$\sim 0.075 \text{ N/m}^2$],
- θ de contacthoek [-],
- r de straal van de porie [m],
- d de poriëndiameter [m].

Figuur 2.13 [29] verklaart bovenstaande formule door de capillaire zuiging uit te zetten in functie van de hoogte van de waterkolom. Uit formule (2.23) kan afgeleid worden dat de capillaire zuiging toeneemt wanneer de poriëndiameter verkleint. Dit kan eenvoudig ingezien worden via het principe van communicerende vaten.

Bij het capillair aanzuigen van water is er echter ook een wrijvingskracht die weerstand hierop uitoefent. Deze stromingsweerstand kan aan de hand van de formule van Poiseuille worden beschreven:

$$\Delta p = 32 \cdot \eta \cdot \frac{v}{d^2} \cdot x \quad (2.24)$$

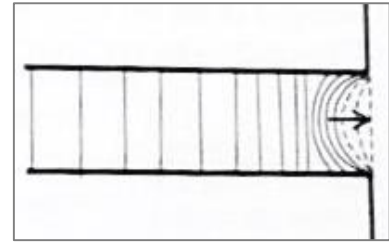
Waarbij

- Δp de stromingsweerstand [Pa],
- η de dynamische viscositeit van water [0.0013 Pa.s],
- v de stroomsnelheid van het water [m/s],
- d de poriëndiameter [m],
- x de lengte die het water heeft afgelegd of ook wel de hoogte van de waterkolom [m].

Hieruit blijkt dat, naast het toenemen van capillaire zuiging, ook de stromingsweerstand tegen de opzuiging toeneemt bij het afnemen van de poriëndiameter. Doordat de stromingsweerstand omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de diameter, en de capillaire zuiging slechts met de diameter zelf, zal het resultaat een vertraging zijn van de wateropname bij het verkleinen van de poriëndiameter.

Daarnaast is het, in kader van verdere proeven, interessant het verschil tussen een verticale en horizontale porie te bespreken. Bij een verticale porie zal water worden aangezogen totdat een evenwichtssituatie is bereikt tussen de capillaire zuiging en de druk uitgeoefend door de zwaartekracht. Op die manier kan een maximale capillaire stijghoogte bepaald worden in de porie. Deze is afhankelijk van de contacthoek en de diameter van de porie. Bijgevolg blijkt dat, hoe fijnporeuzer de materialen in een gebouwconstructie zijn, hoe hoger vocht kan opstijgen.

Bij horizontale poriën, in het geval van mortels en bakstenen in contact met slagregen, bestaat geen evenwichtssituatie. Zolang het water het einde van de porie niet heeft bereikt, wordt het water verder aangezogen. Wanneer het water het einde van de porie toch zou bereiken zal de meniscus langzaam recht worden getrokken en verdwijnt de opzuiging van het water. Figuur 2.14 [4] verduidelijkt dit principe schematisch. Op eenzelfde manier verhinderen de capillaire krachten op dat moment dat de porie terug leegloopt onder invloed van uitwendige drukken.



Figuur 2.14| Horizontale porie [4]

Aldus kan worden opgemerkt dat er verschil ontstaat tussen de theoretische capillaire proeven en de capillaire opzuiging in praktijk. Daar waar poreuze materialen (mortels en baksteen) in praktijk onderhevig zijn aan horizontale capillaire opzuiging van slagregen, zullen ze in labotesten verticaal worden getest. Dit zal geen verschil geven in de resultaten, maar er moet worden opgemerkt dat de maximale aanzuiging verschillend is voor beide situaties. [4] [29]

| CAPILLAIRE OPZUIGING IN POREUZE MATERIALEN

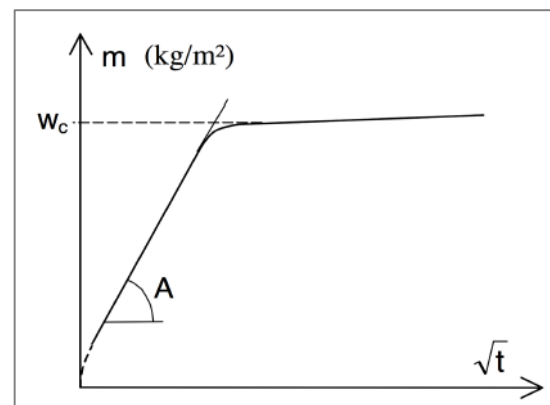
Er kan worden vastgesteld bij het in contact brengen van een homogeen poreus materiaal met water dat het water evenwijdig met het wateroppervlak zal worden aangezogen. Deze aanzuiging zal doorgaan zolang het vochtfront (de scheiding tussen het hygroscopisch vochtig deel en het vochtig (ten gevolge van de capillaire aanzuiging) deel van het materiaal) de overzijde van het materiaal niet heeft bereikt. Wanneer dit wel het geval is, is het capillair vochtgehalte w_c bereikt. De mate waarin het water wordt aangezogen kan worden beschreven aan de hand van de waterabsorptiecoëfficiënt van het materiaal en de tijd:

$$m = A \cdot \sqrt{t} \quad (2.25)$$

Waarbij

- m de massa van het opgezogen water per contactoppervlak [kg/m^2],
- A de waterabsorptiecoëfficiënt van het materiaal [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{0.5}$],
- t de tijd [s].

De waterabsorptiecoëfficiënt is een materiaaleigenschap dat het verband uitdrukt tussen de hoeveelheid opgezogen water en de verstreken tijd. Hoe groter de waterabsorptiecoëfficiënt is, hoe sneller de aanzuiging van het water zal zijn. Deze materiaaleigenschap is te bepalen met een capillaire absorptieproef. Een droog proefstuk, waarvan de massa gekend is, wordt in een wateroppervlak geplaatst. Door de gewichtstoename per contactoppervlak in functie van de tijd ($\sqrt{t}$ respectievelijk) uit te zetten wordt een grafiek zoals op figuur 2.15 [4] bekomen en kan de waterabsorptiecoëfficiënt van het materiaal bepaald worden. (Zie ook Hoofdstuk 6.)



Figuur 2.15| Capillaire opzuiging van water in functie van de tijd [4]

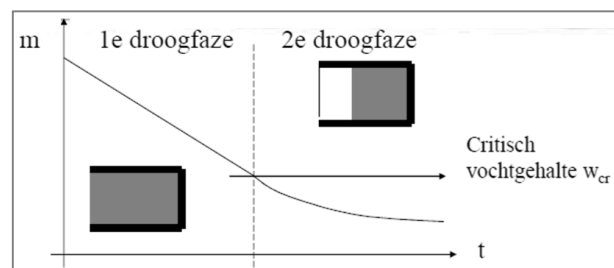
De grafiek kan worden verdeeld in twee zones. In het eerste verloopt de opzuiging beduidend sneller dan in het tweede deel. In dit laatste deel, nadat het capillair vochtgehalte is bereikt, worden de resterende lege poriën langzaam opgevuld totdat het verzadigingsvochtgehalte w_{sat} wordt bereikt.

Uit onderzoek blijkt dat de waterabsorptiecoëfficiënt kleiner is voor fijnporeuze materialen. Bijgevolg zullen fijnporeuze materialen, zoals beton, minder water aanzuigen dan grofporeuze materialen, zoals baksteen. Dit betekent, door deze geringere buffercapaciteit van het beton, dat water sneller zal aflopen van betonnen gevel dan van een gevel in

traditioneel metselwerk. Er dient bijgevolg extra aandacht te worden besteed aan het indringen van vervuild regenwater in de voegen van een gevelmetselwerk.

2.2.4| DROGING VAN POREUZE MATERIALEN

Wanneer een poreus materiaal, na bevochtiging door waterdamp of stromend water, niet meer in contact staat met de originele vochtbron kan deze uitdrogen. Dit gebeurt in twee fases. In een eerste fase wordt het water convectief gedroogd aan het oppervlak. Op het moment dat het materiaal niet langer in staat is om de hoeveelheid water dat verdampt aan het oppervlak aan te voeren vanuit de poriën, start de tweede fase. In deze fase zal het vochtfront zich terugtrekken in het materiaal en het overtollige water diffunderen door een alsmaar dikker worden gedroogd laagje materiaal. Deze mechanismes kunnen gesimuleerd worden met een droogproef. Figuur 2.16 [4] toont de resulterende grafiek uit desbetreffende droogproef.



Figuur 2.16| Droogfases poreus materiaal [4]

| DAMPDIFFUSIE DOORHEEN BOUWCONSTRUCTIES

Het poreus materiaal doorloopt enkele fases gedurende de eerste droogfase. Initieel zijn alle poriën in het materiaal gevuld met water en is het opgenomen vochtgehalte gelijk aan het capillair vochtgehalte w_c . Tijdens het drogen zal het water convectief verdampen aan het vochtfront, dat zich aan het materiaaloppervlak bevindt. Dit gebeurt op een gelijkaardige manier als dat waterdamp capillair kan opgezogen worden (zie Hoofdstuk 2, paragraaf 2.2). Doordat het water verdampt zal zich holle menisci vormen waardoor capillaire zuiging ontstaat, die het grootst is bij de fijnste poriën. Op die manier wordt resterend water uit de poriën aangetrokken tot aan het vochtfront, waar het verder verdampt. Dit proces zal blijven doorgaan totdat de connectie tussen de poriën wegvalt. Op dat moment kunnen de fijne poriën niet langer water aanvoeren en is het kritische vochtgehalte w_{cr} bereikt. Vanaf dan zal het vochtfront zich terugtrekken in het materiaal en start de tweede droogfase.

| HYGROSCOPICITEIT VAN POREUZE MATERIALEN

Het vochtfront zal zich terugtrekken in het materiaal waardoor, zoals getoond door figuur 2.16 [4], er tussen het resterende water in de poriën en het materiaaloppervlak een droog stukje materiaal zal ontstaan. Het resterende water zal in deze fase doorheen dit laagje diffunderen en zal het vochtfront zich bijgevolg nog meer terugtrekken in het materiaal. Op die manier zal het laagje, waardoorheen het water zal diffunderen, dikker worden in de tijd en zal de droogsnelheid in deze fase beduidend lager liggen dan in de eerste fase. De droogsnelheid in deze fase is zowel afhankelijk van het klimaat als van het materiaal zelf. Voor materialen met een hoog diffusieweerstandsgetal (dampdichte materialen) zal de droging trager gaan dan voor dampopen materialen. Daarnaast zullen de temperatuur en relatieve vochtigheid de snelheid ook beïnvloeden. Hoe lager de temperatuur en hoe hoger de relatieve vochtigheid, hoe trager het droogproces zal doorgaan.

Ondanks de betrekkelijk grote droogsnelheid tijdens de eerste droogfase van het vochtige poreuze materiaal gaat het droogproces, in vergelijking met de bevochtiging, veel trager door. Het capillaire absorberen van vocht kan doorgaan in enkele uren, daar waar droging tijdens de eerste fase enkele dagen nodig heeft en de tweede fase enkele jaren kan duren. [24] [30]

2.2.5| LINK NAAR VERDER ONDERZOEK

Zowel het proces van waterdampdiffusie als dat van capillaire aanzuiging van water is van uitermate belang bij het vochttransport doorheen gebouwconstructies. Om het hygrothermisch gedrag van metselwerk te kunnen begrijpen is het van belang deze processen te begrijpen.

Verder in dit onderzoek zal er door middel van labo-onderzoek testen worden uitgevoerd op mortels om het gedrag van mortel beter te kunnen begrijpen en om enkele cruciale eigenschappen (waterabsorptiecoëfficiënt A_w , de porositeit en het capillair vochtgehalte w_c) te kunnen bepalen.

2.3| GEKOPPELD WARMTE- EN VOCHTTRANSPORT

In praktijk zal water- en vochttransport altijd samen gaan in gebouwconstructies. Beide zijn sterk afhankelijk van elkaar. Zo zijn de eigenschappen voor warmteoverdracht vochtafhankelijk, en omgekeerd. Ook zullen temperatuurverschillen leiden tot vochttransport en kan vochttransport leiden tot verplaatsing van latente warmte.

Op het moment dat bij het transport van vocht een toestandsverandering gepaard gaat, zal ook een latente warmteoverdracht plaatsvinden (zie Hoofdstuk 2, paragraaf 2.1). Daarnaast zal in realiteit damptransport doorheen een samengestelde wand niet isotherm gebeuren. Naast de temperatuurgradiënt bestaat ook meestal een dampdrukgradiënt over de constructie. Dit betekent dat op sommige plaatsen het dauwpunt van de lucht, voor die bepaalde relatieve vochtigheid, kan bereikt zijn. Op dat moment zal inwendige condensatie optreden. Om te weten waar dit zal optreden en hoe groot de hoeveelheid condensatie dan zal zijn, kan de methode van Glaser gebruikt worden (zie Hoofdstuk 2, paragraaf 2.2.2). [4]

2.3.1| WARMTEOPSLAG

De warmte die opgeslagen zit in een systeem kan volgens de thermodynamica worden uitgedrukt via de enthalpie van het systeem. Deze toestandsfunctie brengt de inwendige energie van het systeem in verband met de benodigde arbeid om het systeem in stand te houden:

$$H = U + p \cdot V \quad (2.26)$$

Waarbij

H enthalpie van het systeem [J],

U de inwendige energie van het systeem en nodige energie om het systeem tot stand te brengen [J],

$p \cdot V$ nodige arbeid om het systeem tot stand te brengen [J].

De inwendige energie van een systeem is een van de belangrijkste begrippen uit de thermodynamica en wordt beïnvloed door temperatuurschommelingen. De inwendige energie wordt, op moleculaire schaal, bepaald door de kinetische energie van de moleculen en de potentiële energie ten opzichte van elkaar. De wijzigingen van de inwendige energie ten gevolge van warmte of arbeid kunnen bepaald worden volgens de eerste wet van de thermodynamica:

$$\Delta U = Q - W \quad (2.27)$$

Waarbij

ΔU de wijziging in inwendige energie van het systeem [J],

Q de hoeveelheid toegevoegde warmte aan het systeem [J],

W de arbeid, uitgevoerd door het systeem [J].

Er kunnen, afhankelijk van de toegevoegde of onttrokken warmte en de arbeid, enkele thermodynamische processen onderscheiden worden. Zo kan een proces adiabatisch, zonder warmteoverdracht, isochoor, onder constant volume, isotherm of isobaar verlopen. De warmteopslag in bouwconstructies kan isobaar worden beschouwd aangezien de luchtdrukschommelingen klein zijn in vergelijking met de luchtdruk. In de vakliteratuur zijn enkele formules voorhanden om de enthalpie in droge en vochtige materialen, onder isobare omstandigheden, te beschrijven in functie van de temperatuur en de eigenschappen van het materiaal. [21] [23]

2.3.2| VOCHTOPSLAG

Vocht kan opgeslagen worden in materialen in vaste vorm (met gevaar op vorstschade), vloeibare vorm (in de vorm van water of condensaat) en gasvormige toestand (waterdamp). De hoeveelheid opgeslagen vocht zal afhangen van de eigenschappen van het materiaal. Zo zal een poreuzer materiaal meer vocht kunnen opslaan dan een minder poreus materiaal.

Met behulp van de wet van behoud van massa voor het waterdamptransport in poreuze materialen kan de vochttopslag geschreven worden in functie van de dampstroomdichtheid in het materiaal en de dampproductie in het materiaal zelf. Aan de hand van de wet van Fick (formule (2.18)) kan de dampstroomdichtheid tussen twee regio's in het materiaal uitgedrukt worden volgens het verschil in concentratie tussen beide regio's en hun weerstand tegen diffusie, voor diffusief vochttransport. Daarnaast kan vocht zich ook capillair of convectief verplaatsen.

De reden waardoor poreuze materialen dit vocht aanzuigen, en eventueel opslaan, is het hygroscopisch gedrag van het materiaal (zie Hoofdstuk 2, paragraaf 2.2.2). Verschillende mechanismes, zoals moleculaire adsorptie en capillaire condensatie, zullen, afhankelijk van de relatieve vochtigheid van de omgeving, vocht aanzuigen en eventueel opslaan. Deze eigenschap kan worden weergegeven op een hygroscopische curve (figuur 2.11 [29]).

Het hygroscopisch gedrag van materialen heeft enkele belangrijke bouwkundige fenomenen tot gevolg. Zo zijn de hygrische traagheid van gebouwen en de hygrische krimp en uitzetting van materialen ten gevolge van relatieve vochtigheidsschommelingen enkele voorbeelden. De vochttopslag in het materiaal kan immers worden uitgedrukt in functie van de relatieve vochtigheid van de omgeving en dampdruk in het materiaal:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = p \cdot \zeta \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{p_{sat}} \right) \quad (2.28)$$

Waarbij

w het vochtgehalte in het materiaal [kg/m^3],

φ de relatieve vochtigheid van de lucht [-],

t de tijd [s],

$p \cdot \zeta$ de volumieke soortelijke vochtcapaciteit [kg/m^3],

p de dampdruk in het materiaal [Pa],

p_{sat} de dampdruk bij verzadiging, i.e. de maximale dampdruk [Pa].

De afgeleide van het vochtgehalte naar de relatieve vochtigheid van de lucht, $\partial w / \partial \varphi$, is de helling van de raaklijn aan de hygroscopische curve van het materiaal (figuur 2.11 [29]). Deze helling kan ook worden uitgedrukt in de volumieke soortelijke vochtcapaciteit van het materiaal. Sterke hygroscopische materialen (materialen met een grote vochtcapaciteit) zijn sterk gevoelig aan schommelingen in relatieve vochtigheid. Een kleine wijziging in relatieve vochtigheid van de lucht veroorzaakt een grote wijziging in het vochtgehalte van het materiaal. Deze materialen hebben een dempende invloed op de relatieve vochtigheid in de bouwconstructie. Poreuze materialen, zoals baksteen bijvoorbeeld, hebben een lage soortelijke vochtcapaciteit. [4]

|HOOFDSTUK 3: VOORHANDE TESTMETHODES

PARAGRAAF 1 | LABO TESTEN

PARAGRAAF 2 | IN-SITU TESTEN

Teneinde een beter inzicht te verwerven inzake het gedrag en de eigenschappen van poreuze materialen, en in het bijzonder mortels, werden verscheidene testen ontwikkeld. In dit hoofdstuk zal dieper worden ingegaan op enkele testmethodes die de hygrothermische eigenschappen van de materialen kunnen meten en bepalen. Zo werden enkele labo- en in-situ testen ontwikkeld die het toestaan om beter inzicht te verwerven in zowel het vochttransport doorheen het materiaal als de capillaire en diffusieve eigenschappen van de materialen. Daarnaast zijn er ook enkele testen voorhanden rond het warmtetransport doorheen materialen.

PARAGRAAF 1: LABO TESTEN

1 | CUP TEST

2 | CAPILLAIRE ABSORPTIEPROEF

3 | KLIMAATKAST

4 | X-RAY

5 | HOT-BOX TEST

Er bestaan vele verscheidene labotesten om de materiaaleigenschappen van poreuze materialen te testen. Zo bestaan er standaard trek-, schuif- en drukproeven, maar ook methodes om veroudering te simuleren via een proefstuk, de akoestische eigenschappen te bepalen of vermoeiing van het materiaal te testen. Aan de universiteit van Stuttgart werd een onderzoek uitgevoerd naar een 40-tal testmethodes om de eigenschappen van historische constructies te meten en bepalen. De resultaten en testmethodes werden beschreven in het rapport 'Smart Monitoring of Historic Structures – part 1: Report on test methods and former test results'. [31]

In wat volgt worden enkele methodes ter bepaling van de hygrothermische eigenschappen van poreuze materialen toegelicht. Zo kan via een eenvoudige cup test of capillaire absorptietest meer inzicht worden verworven in het vochttransport doorheen en de hygrische eigenschappen van het materiaal. Testen in de klimaatkast kunnen worden gebruikt om het hygroscopisch evenwicht van poreuze materialen te bepalen. Als laatste zal worden toegelicht hoe ook röntgenstraling kan worden gebruikt om het vochttransport doorheen poreuze materialen te analyseren. Daarnaast kan, door middel van een test in een hot box de, warmteweerstand van een samengestelde wand bepaald worden en kan er meer informatie verkregen worden inzake het warmtetransport doorheen het materiaal.

1.1| CUP TEST

Het bepalen van de waterdampdoorlatendheidseigenschappen van materialen gebeurt via een isotherme 'cup test' (zie ook Hoofdstuk 2, paragraaf 2.2.2). Op basis van de Belgisch norm NBN EN ISO 12572 kan een correcte isotherme cup test uitgevoerd worden. Het materiaal, met een gekende massa, wordt op een test cup verzegeld. Deze test cup bevat een droogmiddel (dry cup) of een, met water verzadigde, oplossing (wet cup). Het proefstuk wordt gedurende de test in een klimaatkast met gekende temperatuur en relatieve vochtigheid geplaatst. Ten gevolge van het dampdrukverschil tussen de klimaatkast en de test cup zal vocht zich diffusief verplaatsten doorheen het materiaal. Door middel van het gewicht uit te zetten in de tijd kan de dampstroomdichtheid bepaald worden. Hieruit kunnen verschillende waterdampdoorlatendheidseigenschappen van het materiaal bepaald worden. Deze testmethode werkt zowel voor hygroscopische en niet-hygroscopische materialen.

1.1.1| DRY CUP – WET CUP

De proefopstelling van een dry cup test en een wet cup test zijn gelijkaardig maar door de verschillende randcondities leiden beide testen tot verschillende, en niet te vergelijken, resultaten. De dry cup test wordt toegepast om het watertransport van de omgeving, doorheen het materiaal, naar de cup te meten. Dit is bijvoorbeeld het geval om de regeninslag doorheen een droge gebouwconstructie te meten. De wet cup test wordt gebruikt om de vochtdiffusie uit de cup test, doorheen het materiaal, naar de omgeving te meten. De richting van het vochttransport in beide testen is bijgevolg omgekeerd.

1.1.2| DRY CUP TER BEPALING VAN HET DIFFUSIEWEERSTANDSGETAL EN DE EQUIVALENTE DIFFUSIEDIKTE

In het geval van een dry cup test wordt de massatoename ten gevolge van waterdampabsorptie gemeten. Deze massatoename wordt bepaald door het aanzuigen van waterdamp uit de omgeving door het materiaal en het absorberen van waterdamp uit het materiaal door het droogmiddel in de cup.

Wanneer de massawijziging ten gevolge van diffusie in functie van de tijd wordt uitgezet, wordt een lineair verloop bekomen. Uit de helling van dit verloop en het contactoppervlak van het materiaal kan de waterdampstroomdichtheid bepaald worden. Een correctiefactor kan worden toegepast om overschatting, ten gevolge van het overlappen van het materiaal en de test cup, te vermijden. Aan de hand van de gecorrigeerde waterdampstroomdichtheid en de wet van Fick (formule (2.18)) kan de dampgeleidingscoëfficiënt, δ , van het materiaal bepaald worden. Deze dampgeleidingscoëfficiënt is afhankelijk van de porositeit van het materiaal. Hoe poreuzer het materiaal, hoe gemakkelijker de waterdampmoleculen zich diffusief kunnen verplaatsen doorheen het poriënnetwerk van het materiaal en hoe groter de dampgeleidingscoëfficiënt. Uit de bekomen resultaten kan het diffusieweerstandsgetal, μ , van het materiaal berekend worden met formule (2.19).

De equivalente diffusiedikte, $\mu \cdot d$, wordt berekend uit het diffusieweerstandsgetal en de dikte van de materiaallaag (formule (2.20)). Deze materiaaleigenschap geeft aan wat de breedte van een stilstaande luchtlag zou moeten zijn om een equivalent diffusieweerstandsgetal als het materiaal te hebben.

1.1.3| WET CUP TER BEPALING VAN HET DIFFUSIEWEERSTANDSGETAL EN DE EQUIVALENTE DIFFUSIEDIKTE

Bij een wet cup test wordt het massaverlies ten gevolge van waterdampdiffusie, van de cup naar de omgeving, gemeten. In het geval van materialen met een lage dampweerstand wordt een wet cup test aangeraden.

De formules en methode tot het berekenen van het diffusieweerstandsgetal en de equivalente diffusiedikte van het materiaal zijn dezelfde als bij een dry cup test, waarbij, in dit geval, de gewichtsafname uitgezet wordt in de tijd. [27]

1.2| CAPILLAIRE ABSORPTIEPROEF

1.2.1| TER BEPALING VAN DE WATERABSORPTIECOËFFICIËNT

De waterabsorptiecoëfficiënt van een poreus materiaal wordt bepaald aan de hand van een capillaire absorptieproef (zie Hoofdstuk 2, paragraaf 2.2.3). De waterabsorptiecoëfficiënt is een materiaaleigenschap dat het verband uitdrukt tussen de hoeveelheid opgezogen water en de verstreken tijd. Hoe groter de waterabsorptiecoëfficiënt is, hoe sneller de aanzuiging van het water zal zijn.

NBN EN 1015-18 beschrijft de methode hoe deze proef wordt uitgevoerd. Proefstukken van het poreus materiaal worden in overeenkomst met NBN EN 1015-11 vervaardigd. De stukken harden uit in verzegelde zakken en worden daarna gedroogd, waarbij de evolutie van de massa gevolgd wordt. Het droog proefstuk, met gekende afmetingen en massa, wordt daarna in een wateroppervlak geplaatst. Door de gewichtstoename per oppervlakte in functie van de tijd ($\sqrt{t}$ respectievelijk) uit te zetten wordt een grafiek zoals op figuur 2.15 [4] bekomen en kan de waterabsorptiecoëfficiënt A_w van het materiaal uit de helling van de grafiek bepaald worden. De norm NBN EN 1015-18 rijkt daarnaast nog een eenvoudige formule aan om, aan de hand van de gewichtstoename over 90 minuten, de waterabsorptiecoëfficiënt van het materiaal te bepalen.

N. Karagiannis et al. onderzochten drie verschillende Europese standaarden met betrekking tot het berekenen van de waterabsorptiecoëfficiënt van materialen. Hierbij werd de aangereikte methode van de norm EN 1015-18 ('one tangent method') vergeleken met de Italiaanse UNI 10859 ('30 min method') en de Italiaanse norm 11/85 ('two tangents method'). De testen werden uitgevoerd op steen, baksteen en natuurlijk hydraulische mortels. Uit de testen bleek dat de resultaten telkens dicht bij elkaar lagen maar dat de '30 min method' bij sommige mortels een onderschatting gaf in vergelijking met de andere twee methodes. De 'two tangents method' maakt gebruik van de asymptotische waarde van de massatoename per contactoppervlak en de abscis van het snijpunt (tussen de rechte door de asymptoot en de tangent aan het rechte deel van de kromme) om de waterabsorptiecoëfficiënt van het materiaal te bepalen. Deze methode zou de meest accurate voorstelling geven van de waterabsorptiecoëfficiënt van het materiaal en wordt aangeraden bij materialen waarvan de eerste fase van capillaire absorptie niet lineair verloopt (zie ook figuur 2.15 [4]). [32]

1.2.2| TER BEPALING VAN HET CAPILLAIR VOCHTGEHALTE

Met eenzelfde proef kan ook het capillair vochtgehalte van het proefstuk bepaald worden. Dit is het vochtgehalte van het materiaal op het moment dat het vochtfront het ander einde van het materiaal heeft bereikt en is een maat voor de porositeit van het materiaal. Hoe hoger het capillair vochtgehalte, hoe meer water kan worden aangezogen in de poriën, en hoe poreuzer het materiaal is. Dit wordt geïllustreerd op figuur 2.15 [4]. De grafiek kan worden verdeeld in twee zones. In de eerste zone zal de waterabsorptie sneller verlopen dan in de tweede zone van de grafiek. In dit laatste deel zullen de resterende lege poriën langzaam opgevuld worden totdat het verzadigingsvochtgehalte wordt bereikt. Het capillair vochtgehalte vormt op zich het knikpunt van de grafiek en kan ook als volgt bepaald worden. [4] [33] [34]

1.3| KLIMAATKAST

Poreuze materialen die in contact komen met vochtige lucht zullen vocht aanzuigen totdat het evenwichtsvochtgehalte is bereikt. Dit evenwichtsvochtgehalte is afhankelijk van de relatieve vochtigheid van de omgeving en de hygroscopiciteit van het materiaal.

1.3.1| TER BEPALING VAN HET HYGROSCOPISCH EVENWICHT

Met behulp van een eenvoudige methode kan het hygroscopisch evenwicht [kg/m^3] bepaald worden bij verschillende relatieve vochtigheden. Afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid wordt deze test in een klimaatkast, met constante en precies gekende temperatuur (doorgaans 20°C) en relatieve vochtigheid, of in het labo uitgevoerd.

Door middel van een proefstuk te laten 'rusten' in deze omgeving zal, ten gevolge van de hygroscopiciteit van het materiaal, vocht worden aangezogen volgens figuur 2.11 [29]. Door het afwezige contact met water zal de zone waarbij water capillair wordt opgezogen niet bereikt worden. Door de gewichtstoename van het droog proefstuk uit te zetten in de tijd, kan voor de gekende relatieve vochtigheid van de omgeving het evenwichtsvochtgehalte van het materiaal bepaald worden.

In theorie kunnen poreuze materialen in elke omgeving een hygroscopisch evenwicht bereiken, afhankelijk van de relatieve vochtigheid van de omgeving. Deze test is echter minder accuraat dan wanneer het evenwicht bepaald wordt in een klimaatkast.

1.3.2| TER BEPALING VAN DE HYGROSCOPISCHE UITZETTING

Op gelijkaardige manier kan de hygroscopische uitzetting (dilatatie) of krimp van het materiaal bepaald worden. Proefstukken, met in de norm gespecificeerde afmetingen, worden, na volledige droging in droogovens, in een klimaatkast, met een constante temperatuur van 20°C en gekende relatieve vochtigheid, geplaatst. Door de gewichtstoename van het materiaal in functie van de tijd uit te zetten, kan opnieuw het hygroscopisch evenwicht bepaald worden. Wanneer dit bereikt wordt kan de uitzetting [mm/m] van het materiaal gemeten worden. [31]

1.4| X-RAY

1.4.1| TER BEPALING VAN HET VOCHTGEHALTE EN VOCHTVERDELING

Stralingstechnieken ter bepaling van het vochtgehalte in poreuze materialen worden al langer gebruikt. De originele methodes op basis van gammastraling, NMR (Nuclear Magnetic Resonance) of MRI (Magnetic Resonance Imaging) zijn eendimensionale technieken die een 'scan' maken van het poreuze materiaal op een welbepaald tijdstip. Elk punt in het materiaal wordt op eenzelfde tijdstip gescand. Door middel van interpoleren over tijd kan een profiel van het vochtgehalte in het materiaal bepaald worden.

Latere ontwikkelingen lieten ook toe om röntgenstralen te gebruiken voor deze doeleinden. Een X-ray computer tomografie (tweedimensionale doorsnede van een driedimensionaal voorwerp door middel van een röntgenfoto) kan worden gebruikt om de porositeit en het evenwichtsvochtgehalte te visualiseren. Door middel van een scan van het met vocht verzadigde materiaal 'af te trekken' van een referentiescan van het droog materiaal, kan de porositeit van het materiaal in beeld gebracht worden.

Microfocus röntgenstraling zou een recente maar accurate experimentele techniek zijn voor het meten van het eigenlijke tweedimensionale vochttransport doorheen poreuze materialen. Voorafgaand aan de test wordt een referentiescan van het droge materiaal gemaakt. Deze kunnen achteraf van de testresultaten afgetrokken worden om een kwantitatieve vochthoeveelheid te kunnen bepalen in het materiaal. Wanneer röntgenstraling wordt gemaakt van een capillaire absorptieproef kan de vochthoeveelheid ten gevolge van capillaire zuiging worden bepaald en gevisualiseerd op verschillende tijdstippen in het materiaal. [35]

1.4.2| TER BEPALING VAN DE CHEMISCHE SAMENSTELLING

Via röntgenfluorescentie (X-ray fluorescence), waarbij het bestraalde voorwerp, ten gevolge van de bestraling, zelf zal röntgenstralen uitzenden, kunnen de chemische eigenschappen van de aggregaten en bindmiddelen van de mortel worden bepaald. Wanneer dit met een chemische analyse van de mortel wordt vergeleken kan de samenstelling en de verdeling van de korrelgrootte in de mortel bepaald worden. [36]

1.5| HOT-BOX TEST

1.5.1| TER BEPALING VAN DE WARMTEWEERSTAND

De warmteweerstand van een constructie wordt negatief beïnvloed door het vochtgehalte in de materialen. Ten einde deze te kunnen berekenen voor een bouwconstructie kan de hot-box test worden toegepast. De constructie, of het materiaal, wordt tegen een goed geïsoleerde doos (de box) geplaatst. De temperatuur wordt zowel buiten de box als in de box op een constante temperatuur gehouden door middel van verschillende verhitters. Door middel van een ventilator wordt de geproduceerde warmte binnenin de box homogeen verdeeld en wordt zo een isotherme situatie binnenin de box gecreëerd. Op die manier zal de geproduceerde warmte zich doorheen de constructie convectief verplaatsen. Via het gekende verbruik aan energie, de oppervlaktes van de box en de temperatuurverschillen kan de warmteweerstand van de constructie berekend worden. [37]

PARAGRAAF 2: IN-SITU TESTEN

1 | KARSTEN PROEF

2 | SONDES

Wanneer de materiaaleigenschappen van materialen in reeds bestaande constructies dienen te worden bepaald kan er gebruik worden gemaakt van enkele in-situ testmethodes. In dit deel worden enkele methodes besproken die in-situ kunnen worden toegepast om de hygrothermische eigenschappen van poreuze materialen te kunnen bepalen.

Zo kan via een Karsten proef een capillaire absorptietest benaderd en nagebootst worden. Sondes bieden meer inzicht in het warmtetransport en het vochtgehalte in een wand. Daarnaast kan in-situ visueel onderzoek gedaan worden om de kleur, textuur en afwerking van bestaande constructies te bepalen. Dit is voornamelijk van belang in de restauratie-sector. [36]

2.1| KARSTEN PROEF

2.1.1| TER BEPALING VAN DE WATERABSORPTIECOËFFICIËNT

De Karsten proef biedt een gelijkwaardig in-situ alternatief aan de capillaire absorptieproef ter bepaling van de waterabsorptiecoëfficiënt. [31] Het doel en principe van de test is gelijkaardig. Een Karstenpijpje wordt tegen het materiaal geplaatst en verzegeld met butyl. Nadat het pijpje is gevuld met een gekend volume water zal het materiaal het water in zich opnemen. Door het resterend volume aan water in het pijpje uit te zetten in functie van de tijd kan, op eenzelfde wijze als bij een capillaire absorptieproef, de waterabsorptiecoëfficiënt van het materiaal bepaald worden. [38] Bestaande gebouwen zullen, naast de hygroscopische en capillaire aanzuiging van vocht, ook worden blootgesteld aan grondwater en regen. Deze zullen resulteren in verticaal, ten gevolge van opstijgend vocht of insijpelende regen, of horizontaal, ten gevolge van indringende regen (wind driven rain), vochttransport doorheen het materiaal. De test vormt een systeem om het horizontaal geabsorbeerd vochtvolume in een materiaal te bepalen op een specifiek tijdstip. In het geval van het hydrofoberen van een gevel of het aanbrengen van waterafstotende pleisters, kan de effectiviteit ervan zodoende getest worden met een Karsten proef.

2.2| SONDES

1.2.1| TER BEPALING VAN DE WARMTEWEERSTAND

De vrij complexe hot-box test, ter bepaling van de warmteweerstand van constructies, kan vervangen worden door middel van warmtestroommeters. Deze worden op de constructie aangebracht en geven een spanning af. Wanneer een warmtestroom doorheen de meter passeert zal er een temperatuurverschil over de meter gecreëerd worden. Met de verkregen gegevens kan de warmteweerstand van de bouwconstructie berekend worden. Deze test is eenvoudiger toe te passen en kan in-situ worden uitgevoerd, maar is minder betrouwbaar en accuraat dan de hot-box test. De hot-box zelf kan, in theorie, ook worden toegepast in-situ maar is vrij omslachtig. De box kan soms moeilijk geïnstalleerd worden in bewoonde gebouwen en ook het temperatuurverschil is vrij moeilijk te verwezenlijken. [37]

1.2.2| TER BEPALING VAN HET VOCHTGEHALTE EN VOCHTVERDELING

Het vochtgehalte van een bouwconstructie kan door middel van λ -sondes bepaald worden. In plaats van de totale warmteweerstand over de constructie te meten, zoals bij warmtestroommeters, wordt de warmtegeleidingscoëfficiënt λ van het materiaal in functie van de doorsnede gemeten. De sonde wordt in boorgaten in de constructie ingebracht en is opgebouwd uit enkele elektrische geïsoleerde thermo-elementen en een verhitterdraad. Wanneer een elektrische stroom door de draad wordt gestuurd kan de temperatuurswijziging in de thermo-elementen gemeten worden. Hoe beter het materiaal in de omgeving van de sonde isoleert, hoe sterker de temperatuurswijziging zal zijn. Van zodra het verband tussen het vochtgehalte en de warmtegeleidingscoëfficiënt gekend is, kan de vochtverdeling en de vochtverplaatsing in de constructie bepaald worden.

De λ -sondes blijken een doeltreffende en betrouwbare techniek, maar kunnen niet op elk materiaal toegepast worden. Ook zouden de fluctuaties van de temperatuur in de omgeving van de sondes de meetresultaten kunnen beïnvloeden, daar zij ook temperatuurswijzigingen in de thermo-elementen doen ontstaan. [37]

|HOOFDSTUK 4: HAM-SIMULATIES

PARAGRAAF 1 | HAM-SIMULATIES

PARAGRAAF 2 | UITVOERING IN DELPHIN

HAM-simulatieprogramma's bieden de mogelijkheid complexe warmte-, lucht- en vochttransporten doorheen gebouwfragmenten dynamisch numeriek op te lossen. In dit hoofdstuk zal dieper worden ingegaan op verschillende HAM-simulatieprogramma's, de wiskundige vergelijkingen achter deze numerieke oplossingsmethode en de gekozen methode voor dit onderzoek.

PARAGRAAF 1: HAM-SIMULATIES

1 | ACHTERGROND

2 | HAM-SIMULATIEPROGRAMMA'S

3 | SIMULATIEPROGRAMMA DELPHIN

Een vijftal HAM-simulatieprogramma's zijn voorhanden, waarvan Delphin en WUFI de meest accurate modellen zijn om 1D en 2D simulaties uit te voeren voor warmte-, lucht- en vochttransport doorheen gebouwconstructies. In deze paragraaf worden de verschillen tussen beide programma's beschreven en wordt dieper ingegaan op de werking van Delphin.

1.1 | ACHTERGROND

Bij het analyseren, voorspellen en simuleren van het hygrothermisch gedrag van bouwconstructies, dient rekening te worden gehouden met het warmte-, lucht- en vochttransport in en doorheen de constructie. Deze mechanismes beïnvloeden elkaar en het gedrag van de constructie, maar worden ook beïnvloed door de opbouw en de materialen in de constructie. Veelal worden deze processen vereenvoudigd en apart gekoppeld aan specifieke bouwmaterialen. Zo wordt de thermische isolatie gekoppeld aan het warmtetransport, de luchtdichtheid en eventuele lekkages aan het luchttransport, en het regenscherm en damp scherm aan het vochttransport. In realiteit zijn deze processen echter complexer en meer verweven met elkaar (zie Hoofdstuk 2, paragraaf 2). [39]

Aan de hand van dynamische hygrothermische simulaties, ofwel numerieke HAM²-simulaties, kan zowel het warmte-, lucht- als vochttransport in en doorheen gebouwcomponenten gesimuleerd en geanalyseerd worden. Deze transportmechanismes worden gesimuleerd bij fluctuerende randvoorwaarden (variaties in temperatuur, luchtdruk en vochtigheid) en aangepaste materiaaleigenschappen (afhankelijk van de temperatuur en vochtigheid). In tegenstelling tot een statische methode (zoals de grafische methode van Glaser (verduidelijkt door figuur 2.10 [4]) waarbij verschillende vereenvoudigingen (maandgemiddeldes, standaard randvoorwaarden en vereenvoudigde mechanismes) worden doorgevoerd) kan een dynamische simulatie wel rekening houden met de warmte- en vocht opslag, vochtbuffering, en het aanwezige water- en vochttransport doorheen het element. [40]

Hedendaagse dynamische HAM-simulaties hebben verschillende toepassingsgebieden. Ze kunnen worden gebruikt om bouwschade vast te stellen bij bestaande gebouwen of eventuele hygrothermische schade te voorspellen in ontwerpfasen. Daarnaast is het mogelijk om specifieke herstellingsmaatregelen op voorhand te simuleren en analyseren. Zo kan inwendige condensatie, schimmelgroei en de uitdrogingstijd van verschillende elementen op voorhand bepaald worden. Ook bij de ontwikkeling en het onderzoek naar nieuwe systemen en producten worden HAM-simulaties meer en meer gebruikt. [29] [40]

1.2 | HAM-SIMULATIEPROGRAMMA'S

Op de markt zijn een vijftal HAM-softwarepakketten voorhanden, waarvan Delphin en WUFI de meest accurate en up-to-date modellen zijn. Beide modellen laten zowel 1D als 2D simulaties toe voor gekoppeld warmte- en vochttransport, en bevatten nauwkeurige beschrijvingen van vloeibaar vochttransport, dampdiffusie en luchttransport. Toch zijn er enkele grote verschillen tussen beide modellen.

Bij beide modellen worden de verschillende aanwezige transportmechanismes, door middel van een set aan differentiaalvergelijkingen, in een wiskundig model beschreven. Aangezien deze set een niet-lineair systeem is en afhankelijk is van verschillende potentialen (temperatuur en watergehalte) is een analytische oplossing niet mogelijk. Beide HAM-software pakketten Delphin en WUFI³ maken daarom gebruik van een numerieke (op basis van iteratie en logica) oplossingsmethode. [41]

1.2.1 | WUFI

In de numerieke methode van WUFI worden de verschillende differentiaalvergelijkingen gediscretiseerd via een 'implicit finite volume method' en iteratief opgelost. Bij het opstellen van de vergelijkingen werd een selectie gemaakt van de aanwezige transportmechanismes. Zo werd er voor het warmtetransport thermische conductie, enthalpiestromingen, kortgolvlige en langgolvlige straling geïntegreerd. Voor het vochttransport werd rekening gehouden met waterdampdiffusie, diffusie van oplosstoffen, diffusie aan het oppervlak en capillaire zuiging. Zowel convectie bij warmte- als vochttransport werd niet in rekening gebracht. Deze vereenvoudigingen kunnen leiden tot afwijkingen in de resultaten. [41] [42] [43]

Daarnaast stelt Künzle in zijn onderzoek naar gekoppeld warmte- en vochttransport [41] vragen omtrent de nauwkeurigheid bij het beschrijven van het vochtgedrag van tijdsafhankelijke bouwmaterialen. Daar waar onomkeerbare wijzigingen over lange termijn (zoals de carbonatatie of uitharden van mortels) wel in rekening kunnen gebracht worden, kan dit niet voor fluctuaties over korte termijn (zwellen en krimp in de poriën). Een manier om deze toch in rekening te brengen is door tijdsafhankelijke materiaalparameters te gebruiken die toch rekening houden met de fluctuaties op korte termijn. Dit zal echter ook resulteren in onnauwkeurigheden in de simulaties.

2 Heat, air and moisture

3 Wärme Und Feuchte Instationär of transient one or two-dimensional heat and moisture transport

De vereenvoudigingen in de gebruikte modellen en eenvoudigere interface leiden dan weer wel tot een gebruiksvriendelijk programma met korte simulatietijden.

1.2.2 | DELPHIN

Delphin (voorheen DIM) is een numeriek HAM-simulatie programma, ontwikkeld aan TU Dresden, dat de mogelijkheid biedt gekoppeld warmte-, lucht, vocht- en zouttransport in poreuze materialen te simuleren. Ook hier wordt de set aan differentiaalvergelijkingen numeriek opgelost door middel van integratie over tijd. Op die manier is het mogelijk om het hygrothermisch gedrag (zoals het vochtgehalte, relatieve vochtigheid, straling, temperatuur, luchtdruk, warmte en enthalpie) van bouwconstructies te bepalen in functie van tijd en ruimte. Delphin laat toe zowel 1D, 2D en axiaal symmetrische 3D constructies te simuleren. [44]

De differentiaalvergelijkingen die de verschillende transportmechanismen beschrijven zijn minder eenvoudig dan in WUFI. Samen met de minder toegankelijke interface, leidt dit tot een grotere noodzakelijke bouwfysische achtergrond en langere simulatietijden. Dit, aan de andere kant, resulteert wel in een grotere betrouwbaarheid bij complexe berekeningen.

Er dient ook te worden opgemerkt dat, ondanks de nauwkeurigheid van beide HAM-modellen, en de grote hulp dat ze bieden bij hygrothermische analyses van gebouwonderdelen, de resultaten niet de absolute waarheid zijn en een vereenvoudiging van de realiteit blijven. Door middel van parametervariaties, experimentele bepaling van materiaaleigenschappen en een, eventuele, stochastische analyse van de onzekerheden, kunnen de bestaande onzekerheden gepeild worden en kan de integriteit van de oplossing worden verhoogd. [40]

Op basis van bovenstaande argumenten werd er, in de lijn van deze thesis, gekozen om de noodzakelijke simulaties in Delphin uit te voeren.

1.3 | SIMULATIEPROGRAMMA DELPHIN

1.3.1 | NUMERIEKE SIMULATIE

In deze thesis werd voor de simulaties gebruik gemaakt van Delphin 5, versie 8.4. Deze generatie, Delphin 5/ CHAMPS-BES⁴, is de opvolger van Delphin 4 (voorheen DIM) en vormt een toegankelijker en recenter model, met als basis Delphin 4. Bij deze generatie werd een eenduidige programmeercode gebruikt en werden de numerieke algoritmes en het fysisch model verbeterd en uitgebreid. In wat volgt wordt kort ingegaan op de werking van Delphin 5/ CHAMPS-BES. [45]

| DIFFERENTIAALVERGELIJKINGEN

Het warmte-, lucht- en vochttransport doorheen gebouwconstructies wordt in HAM-modellen geformuleerd met behulp van massabalansen (in de vorm van differentiaalvergelijkingen). Op die manier kan een luchtmassabalans, een vochtmassabalans en een balans van de inwendige energie opgesteld worden. Deze vergelijkingen zijn afhankelijk van verschillende potentialen (zoals de temperatuur of het watergehalte) en transportcoëfficiënten (zoals gasconductiviteitscoëfficiënt of warmtegeleidingscoëfficiënt). Deze coëfficiënten worden gespecificeerd in de materiaalfuncties. Deze functies beschrijven, op basis van metingen, het gedrag van het materiaal bij opslag en transport. De daaruit volgende opslag- en transportcoëfficiënten worden toegepast in de differentiaalvergelijkingen en worden door de simulatieprogramma's, aangezien de complexiteit ervan een analytische oplossing niet toelaat, op een numerieke manier opgelost.

Delphin 5/ CHAMPS-BES maakt gebruik van vier massabalansen: een vochtmassa-, luchtmassa-, VOC⁵-massa en inwendige energie massabalans, waarbij gebruik gemaakt wordt van een plaatselijk vast REV⁶. Het REV bevat een representatieve configuratie van het te simuleren poreuze materiaal. Op die manier kan een moeilijke configuratie vermeden worden. Een partiële ontkoppeling van de luchtmassabalans leidt tot een optimum in de nauwkeurigheid en prestatie van de oplossing. Op de massabalansen wordt bijgevolg een 1-2-1 oplossingsmethode toegepast. Eerst wordt

4 Coupled Heat, Air, Moisture and Pollutant Simulation for Building Envelope Systems

5 Volatile Organic Compound of vluchtige organische stof

6 Representative elementary volume of plaatselijk referentievolume

de massabalans van droge lucht uiterekend onder quasi-steady state condities. Daarna wordt de gekoppelde warmte- en vochtbalansen berekend, en uiteindelijk de VOC-massabalans.

Deze balansen kunnen worden beschreven door een algemene formule in functie van het referentievolume en een algemene grootheid E. Deze grootheid staat voor alle grootheden waarvoor de wet van behoud van massa geldt, zoals massa, inwendige energie en entropie.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{REV}^E) = \frac{\partial}{\partial x}(j^E) + \sigma_{REV}^E \quad (4.1)$$

Waarbij

ρ_{REV}^E de massadichtheid van E in het referentievolume [kg/m³],

j^E de massaflux van E [kg/m²s],

σ_{REV}^E de productie of afvoer van E [kg/m³s].

Er dient te worden opgemerkt dat in de door Delphin gebruikte formules de massaflux algemeen wordt genoteerd als j . In de literatuurstudie (zie Hoofdstuk 2, paragraaf 2) worden deze gespecificeerd, en wordt de massaflux aan vocht als q en de massaflux aan warmte als q genoteerd.

In wat volgt worden de algemene vergelijkingen per massabalans weergegeven. Delphin doet verschillende aannames bij de opstelling van deze balansen. Deze aannames en de volledig uitgewerkte vergelijkingen werden uitgewerkt in Bijlage D.

| Vochtmassabalans

De vochtmassabalans kan als volgt worden geformuleerd:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{REV}^{m_{v+w}}) = \frac{\partial}{\partial x}(j_{conv}^{m_w} + j_{conv}^{m_v} + j_{diff}^{m_v}) + \sigma_{REV}^{m_{v+w}} \quad (4.2)$$

Waarbij

$\rho_{REV}^{m_{v+w}}$ de massadichtheid van het vocht (vloeibaar en waterdamp) in het referentievolume [kg/m³],

$j_{conv}^{m_w}$ de massaflux voor convectief transport van vloeibaar capillair water [kg/m²s],

$j_{conv}^{m_v}$ de massaflux voor convectief transport van waterdamp [kg/m²s],

$j_{diff}^{m_v}$ de massaflux voor diffusief transport van waterdamp [kg/m²s],

$\sigma_{REV}^{m_{v+w}}$ de productie of afvoer van vocht (vloeibaar en waterdamp) in het referentievolume [kg/m³s].

| Luchtmassabalans

De luchtmassabalans kan als volgt worden geformuleerd:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{REV}^{m_a}) = \frac{\partial}{\partial x}(j_{conv}^{m_a}) + \sigma_{REV}^{m_a} \quad (4.3)$$

Waarbij

$\rho_{REV}^{m_a}$ de massadichtheid van de lucht in het referentievolume [kg/m³],

$j_{conv}^{m_a}$ de massaflux voor convectief transport van de lucht [kg/m²s],

$\sigma_{REV}^{m_a}$ de productie of afvoer van lucht in het referentievolume [kg/m³s].

| VOC-massabalans

De VOC-massabalans kan als volgt worden geformuleerd:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{REV}^{m_{VOC,l+g}}) = \frac{\partial}{\partial x}(j_{conv}^{m_{VOC,g}} + j_{diff}^{m_{VOC,g}} + j_{conv}^{m_{VOC,l}}) + \sigma_{REV}^{m_{VOC,l+g}} \quad (4.4)$$

Waarbij

$\rho_{REV}^{m_{VOC,l+g}}$ de massadichtheid van VOC (vloeibaar en gasvormig) in het referentievolume [kg/m³],

$j_{conv}^{m_{VOC,g}}$ de massaflux voor convectief transport van gasvormig VOC [kg/m²s],

$j_{diff}^{m_{VOC,g}}$ de massaflux voor diffusief transport van gasvormig VOC [kg/m²s],

$j_{conv}^{m_{VOC,l}}$ de massaflux voor convectief transport van opgelost of geabsorbeerd VOC [kg/m²s],

$\sigma_{REV}^{m_{VOC,l+g}}$ de productie of afvoer van VOC in het referentievolume [kg/m³s].

| Inwendige energiebalans

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{REV}^U) = \frac{\partial}{\partial x}(j_{conv}^U + j_{diff}^U) + \sigma_{REV}^U \quad (4.5)$$

Waarbij

ρ_{REV}^U , de massadichtheid van de inwendige energie van het referentievolume [kg/m³],

j_{conv}^U , de massaflux voor convectief warmtetransport van de inwendige energie [kg/m²s],

j_{diff}^U , de massaflux voor diffusief warmtetransport van de inwendige energie [kg/m²s],

σ_{REV}^U , de productie of afvoer van energie in het referentievolume [kg/m³s].

| OPLOSSING

CHAMPS, het onderliggend fysisch model van Delphin 5, omvat de beschrijving van verschillende massafluxen in het materiaalveld (tussen verschillende elementen of over materiaal-interfaces) en bij de grens (tussen verschillende elementen of tussen buiten en binnen). De modellen van deze massafluxen en –opslag worden beschreven door de verschillende massabalansen, die door Delphin numeriek worden opgelost. Wanneer verschillende voorwaarden (Delphin 5 maakt gebruik van klimaat-, rand-, initiële-, veld- en contactvoorwaarden (zie Hoofdstuk 4, paragraaf 1.3)) gedefinieerd zijn, kunnen de massabalansen, door middel van een semi-discretisatie in de ruimte en integratie in de tijd, numeriek opgelost worden. [44] [46]

1.3.2 | ONZEKERHEDEN

| MODEL

Enkele onzekerheden zijn inherent aan het, door Delphin gebruikte, oplossingsmodel. Zo wordt er gebruik gemaakt van complexe, doch licht vereenvoudigde, massabalansen van de transportmechanismen in en door bouwelementen (zie Hoofdstuk 4, paragraaf 1.3.1). Daarnaast blijkt uit het onderzoek van Künzel naar gekoppeld warmte- en vochttransport naar [41] dat de keuze van numeriek rooster en tijdsstap effect hebben op de nauwkeurigheid van de oplossing. Künzel stelt in zijn artikel enkele voorwaarden waaraan voldaan moet worden (inzake de discretisatie van het rooster en de tijdsstappen) om de simulatie te optimaliseren. [41]

Het nagaan van de gebruikte modellen en vergelijkingen, en diens onzekerheden, kan een zicht bieden op de nauwkeurigheid van de bekomen oplossing.

| INVOERKARAKTERISTIEKEN

Zowel bij de bepaling van de materialen en hun eigenschappen als bij de definiëring van de randvoorwaarden kunnen onregelmatigheden optreden.

De database van Delphin 5.8.4 bevat een grote variatie aan mogelijke materialen met aanpasbare materiaaleigenschappen. In het geval van mortels is er echter een beperkte selectie gedefinieerd. Door middel van de voorhanden mortels daaraan aan te passen aan de experimenteel bepaalde materiaaleigenschappen aan te passen, worden de onderzochte proefstukken zo accuraat mogelijk benaderd door het model. Deze methode werd toegepast in dit onderzoek en resulteerde zo in representatievere en nauwkeurigere resultaten. [46]

Bij de bepaling van de klimaatvoorwaarden zijn, aangezien er gebruik gemaakt wordt van referentiejaar, ook enkele onzekerheden aanwezig in het model. Deze referentieklimaatcondities beschrijven tijdsafhankelijke belastingen op de constructie, zoals de dauwpunttemperatuur, zonnestraling, windgrootte en –richting, omgevingstemperatuur en bewolking. Deze fluctuerende condities worden in teststations uurlijks opgemeten, ter controle uitgemiddeld over een maand, gebundeld in een Design Reference Year (DRY) en geïmplementeerd in het numeriek model. Deze uitmiddeling in referentiejaar zorgt voor kleine afwijkingen in de simulaties. Doordat er geen DRY voor België voorhanden is, wordt gebruik gemaakt van de klimaatdata van Essen hetgeen de meest representatieve dataset is. Aangezien deze data uurlijks werd opgemeten, dient er rekening te worden gehouden met mogelijke afwijkingen wanneer een kleinere tijdsstap wordt gebruikt bij de simulaties. [46] [47]

Voor dit onderzoek werd gebruik gemaakt van 1D en 2D simulaties in Delphin op basis van een klimaatdataset van Essen. De materiaalkarakteristieken werden aangepast aan de bekomen resultaten uit het labo-onderzoek. Aangezien onnauwkeurigheden in de materiaaleigenschappen zoveel mogelijk vermeden werden door labo-onderzoek en de DRY van Essen de best mogelijke benadering van het Belgisch klimaat is, werd op die manier zo goed mogelijk voorzien op onnauwkeurigheden en onzekerheden in het model.

1.3.3| INTERFACE

In Delphin 5.8.4 kunnen zowel 1D, 2D en axiaal symmetrische 3D gebouwconstructies gesimuleerd worden. In een eerste stap wordt de constructie opgebouwd en worden materialen en randvoorwaarden toegekend. Deze zijn van belang voor het numeriek oplossen van de massabalansen. Na het definiëren van de gewenste output kan de constructie gesimuleerd worden. Aan de hand van post-processing kan het verkregen resultaat verder verwerkt worden.

| CONSTRUCTIE

De geometrie van de te onderzoeken constructie wordt in een rooster gemodelleerd. Door middel van het instellen van de afmetingen van het rooster kan op een tweedimensionale manier de geometrie gedefinieerd worden. De gewenste materialen kunnen, na eventuele aanpassingen, rechtstreeks uit de bestaande database geïmporteerd worden. Opdat het model numeriek zou kunnen worden opgelost door Delphin dient de geometrie gediscretiseerd te worden in kleine elementen. Delphin staat zowel discretisatie op constante afstand, als variabele discretisatie, in zowel x- als y-richting toe. Binnenin een constructie-element kan een minder fijne discretisatie worden toegepast dan aan de grenzen van de elementen en interface van en tussen materialen.

| VOORWAARDEN

Opdat het model numeriek zou kunnen worden opgelost door Delphin, dienen er enkele voorwaarden te worden gedefinieerd. Aan de geometrie kunnen zowel rand- als beginvoorwaarden worden toegekend. Deze omschrijven de condities aan de oppervlakken tijdens en aan het begin van de periode waarover wordt gesimuleerd. Zo kan er, in dit specifieke onderzoek, gebruik worden gemaakt van een wateroppervlak als randvoorwaarde. Daarnaast kunnen veld- en contactvoorwaarden gedefinieerd worden. Door middel van veldvoorwaarden kunnen bronnen of verliezen van massa of energie worden toegekend aan de constructie. Contactvoorwaarden beschrijven de eventuele extra weerstanden tussen materialen, of waterdampdiffusie en warmtegeleiding aan het contactoppervlak tussen materiaal- en luchtlagen. Klimaatvoorwaarden worden toegekend aan de gehele constructie in de vorm van DRY. In het geval van België wordt Essen als benaderend klimaat gekozen.

| SIMULATIES

De gewenste outputs kunnen, door middel van tijdschema's en formats (temperatuur, massafluxen, massadichtheden en -hoeveelheden), gedefinieerd en toegekend worden aan specifieke elementen in de constructie. Op die manier kunnen verschillende eigenschappen van specifieke elementen onderzocht en gesimuleerd worden. Door middel van post-processing kan de simulatie-uitkomst aangepast en verder verwerkt worden. [46]

PARAGRAAF 2: UITVOERING IN DELPHIN

1 | INVOERKARAKTERISTIEKEN

2 | INTERFACE MORTEL-BAKSTEEN

In deze paragraaf wordt kort ingegaan op de, in dit onderzoek, gehanteerde aanpak en wordt beknopt de manier waarop de grenswaarde hierin benaderd wordt verantwoord.

2.1| AANPAK

De simulaties in Delphin zullen in drie delen worden aangepakt. In een eerste deel zal de uitgevoerde capillaire absorptieproef nagebootst worden. Hiervoor zullen de, uit het experimenteel luik bekomen, resultaten in Delphin geïmplementeerd worden, en zal kunnen worden aangetoond hoe accuraat de gebruikte materialen en diens eigenschappen zijn. In een tweede deel worden twee gemetste bakstenen gesimuleerd. Hierbij zal telkens gebruik gemaakt worden van een baksteen met een gelijkaardige, een beduidend hogere en een beduidend lagere waterabsorptiecoëfficiënt als de legmortel. Hieruit zullen conclusies kunnen worden getrokken inzake de grensweerstand tussen baksteen en mortel (zie Hoofdstuk 4, paragraaf 2.2). In het derde en laatste deel zal een realistische massieve muur onder reële klimaatdata worden gesimuleerd. Hieruit worden enkele conclusies getrokken inzake het hygrothermisch gedrag van verschillende mortels, de invloed van stoot- en lintvoegen, de interactie tussen baksteen en mortel, en een eerste aanzet naar de gevolgen van foutief restaureren. (zie Hoofdstuk 7).

2.2| INTERFACE MORTEL-BAKSTEEN

In numerieke simulaties wordt metselwerk veelal als een homogene baksteenlaag voorgesteld. Al brengt deze vereenvoudiging enkele voordelen met zich mee, de nauwkeurigheid van de bekomen resultaten kan in vraag worden gesteld. Deze homogene beschouwing zal namelijk een overschatting van het vochttransport doorheen de wand inhouden aangezien, in praktijk, blijkt dat het vochttransport doorheen een samengestelde wand afwijkt van deze doorheen de lagen apart en een vertraagde wateropname inhoudt. [48] Uit het onderzoek van Derluyn et al. [49] naar de massaflux doorheen het grensoppervlak (interface) tussen baksteen en mortel bleek dat de afwijking op het vochttransport te wijten was aan een combinatie van het bestaan van een grensweerstand (interface resistance) en de lichte wijziging in morteleigenschappen tijdens het uitharden. Beide fenomenen blijken na onderzoek [50] afhankelijk te zijn van de condities waarin de mortel uithardt. Er werden absorptieproeven uitgevoerd op kalkcementmortels die elk op een verschillende manier waren uitgehard. Er werd gebruik gemaakt van 'dry cured'⁷ mortel, 'wet cured'⁸ mortel en mortel die was uitgehard in een mal. De in een mal uitgeharde mortel, in combinatie met baksteen en een kaolien laag, vormde een perfect hydraulisch contactoppervlak tussen de steen en mortel. In praktijk zal mortel in een gebouwde constructie een initieel vochtgehalte bevatten dat zich tussen beide uitersten ('dry cured' en 'wet cured') bevindt.

De aanwezige grensweerstand kan verklaard worden doordat bij het aanbrengen van mortel op baksteen, tijdens het uitharden, kleine mortelpartikels doordringen in baksteenporiën. Op die manier wordt de poriestructuur uitgebreid en een grensvlak gevormd. Dit resulteert in een vermindering van de permeabiliteit. Daarnaast zal de waterextractie tijdens het uitharden resulteren in een snelle verdichting van de mortel en de aanwezigheid van luchtholtes (compaction pores) aan de grenslaag. Deze reductie in contactoppervlak met baksteen leidt tot een verhoogde weerstand aan het grensoppervlak. Als laatste zal ook de wanverhouding in poriënsysteem tussen beide materialen (waarbij de poriëstraal van baksteen 100 maal groter is dan die van mortel) leiden tot een grensweerstand tussen beide materialen. [50]

De wijzigingen in morteleigenschappen tijdens het uitharden is te wijten aan de extractie van aanmaakwater door de baksteen tijdens het uitharden van de mortel. Aan de hand van een cuptest [50] kon, via de massatoename van de baksteen in functie van de hoeveelheid aanmaakwater van de mortel, worden vastgesteld dat de waterextractie bij een 'dry cured' mortel 30%, en bij een 'wet cured' mortel slechts 6%, bleek te zijn. Door deze waterextractie daalt de water-cement ratio tijdens het uitharden. Bijgevolg daalt ook de porositeit (zowel open als effectief) en de hoeveelheid grove poriën. Aangezien de dichtheid, dampdichtheid en mate van waterabsorptie afhankelijk zijn van de porositeit zullen deze ook wijzigen tijdens het uitharden. Het onderzoek van Derluyn et al. [50] wees echter uit dat het aanpassen van de morteleigenschappen (e.g. moisture retention curve) een verwaarloosbare impact had in vergelijking met het totaal vochtgehalte.

Aan de hand van absorptieproeven [50] konden verschillende vochtprofielen worden opgesteld en op die manier waarden toegekend worden aan de grensweerstand voor enkele samengestelde constructies. Er dient wel rekening te worden gehouden met de specificiteit van deze proeven. De waarden zijn afhankelijk van het morteltype (additieven en bindmiddelen), het baksteentype (capillariteit en porositeit), de condities bij uitharding en de dikte van de mortellaag. Door het beperkt aanbod aan correcte waarden voor de grensweerstand zal in ook dit onderzoek worden gebruik gemaakt van de bekomen resultaten van Derluyn et al. [50] Daarbij werd een grensweerstand R_{if} van $1.25 \cdot 10^{10}$ m/s voor een 'wet cured' mortel en $2.5 \cdot 10^{10}$ m/s voor een 'dry cured' mortel bepaald. In het onderzoek van Vereecken [48] worden

⁷ Waarbij de mortel wordt aangebracht op ovengedroogde bakstenen. Aangezien de bakstenen volledig droog zijn, wordt er verwacht dat zij een grote hoeveelheid aanmaakwater onttrekken aan de mortel.

⁸ Waarbij de mortel wordt aangebracht op capillair verzadigde bakstenen. Aangezien de bakstenen verzadigd zijn, wordt er verwacht dat zij geen aanmaakwater onttrekken aan de mortel.

grensweerstand van respectievelijk $2.5 \cdot 10^{10}$ en $5 \cdot 10^{10}$ m/s bepaald. Deze tegenstrijd zal onderzocht worden door de grensweerstand in de simulaties stapsgewijs te variëren.

Uit het onderzoek konden ook enkele praktische conclusies worden getrokken. Zo zal, ondanks de lagere waterabsorptiecoëfficiënt van mortel, een homogene mortellaag meer vocht absorberen dan een homogene baksteenlaag. Toch blijkt, wanneer een combinatie van bakstenen en mortel wordt beschouwd, de mortellaag het hoofd infiltratiepad te zijn voor vocht. Bij deze combinaties blijkt het geabsorbeerd vochtgehalte slechts een fractie hoger te zijn dan van een homogene baksteenlaag. Ook zal, door tragere uitdroging, een mortel, in combinatie met bakstenen, nooit volledig uitdrogen en het geabsorbeerd vocht naar de binnenzijde van de constructie transporteren. Daarnaast werd vastgesteld dat voor een 'dry cured', 'wet cured' mortel en een in de mal gedroogde mortel, in die volgorde, het capillair vochtgehalte en snelheid van waterabsorptie oploopt, en de grensweerstand afneemt. In het geval van een massieve steense muur, waarbij 'inwendige stootvoegen' (tussen beide baksteenlagen) aanwezig zijn, wordt gemerkt dat, door de tragere progressie van het vochtfront in de baksteen (en de verhoogde progressie in de mortel), het vochttransport naar de stootvoeg eerder door de lintvoegen zal plaatsvinden dan door de grenslaag tussen de baksteen en mortel. Bij het simuleren van een massieve steense muur mag worden uitgegaan van een gelijk vochttransport tussen de buitenste laag bakstenen en inwendige stootvoeg, en tussen de 'inwendige stootvoeg' en binnenste baksteenlaag. De positie van deze stootvoeg (halve steen of steen, afhankelijk van het type muuropbouw) blijkt een verwaarloosbare invloed te hebben op het opgenomen watergehalte. Als laatste kon er worden opgemerkt dat, ondanks dat er kan worden verwacht dat de waterextractie bij 'wet cured' mortels minimaal tot nihil is, er toch substantiële wijzigingen in de hygrische eigenschappen van de mortel plaatsvonden. Dit kan mogelijks worden verklaard doordat de natte stenen tijdens en net voor het aanbrengen van de mortel minimaal uitdrogen. Hierdoor kan tijdens de eerste minuten van de uitdroging een kleine hoeveelheid water worden opgenomen uit de mortel. Daarnaast zou het ook kunnen dat ook de waterextractie op lange termijn mee de finale hygrische eigenschappen van de mortel bepalen. [49]

|HOOFDSTUK 5: ONDERZOEKSVRAAG

Uit de literatuurstudie blijkt dat het hygrothermisch gedrag van poreuze materialen complexe materie is. Als een gevolg wordt bij simulaties en dieper onderzoek hieromtrent vaak uitgegaan van vereenvoudigde opstellingen. Zo wordt metselwerk veelal als een gehomogeniseerde baksteenlaag voorgesteld. Studies toonden aan dat deze homogenisering een overschatting van de realiteit is. [48] [50] Om deze redenen leek het interessant dieper in te gaan op historische mortels en hun invloed op het vochtgedrag van metselwerk.

Door middel van experimenteel onderzoek zal vooreerst getracht worden beter inzicht te krijgen in het gedrag van verschillende historische kalk- en cementmortels. Zo zullen onderlinge verschillen en verhoudingen kunnen worden bepaald.

Met behulp van de verworven inzichten en bekomen resultaten kan een zo representatief mogelijke massieve muur gemodelleerd worden in Delphin. Door de mortelvoegen en grensweerstand tussen baksteen en mortels mee te simuleren en deze te vergelijken met homogene baksteenwanden, kan de invloed van mortels bepaald worden, alsook de interactie tussen baksteen en mortel.

Daarnaast werd uit de literatuur duidelijk dat onderzoek naar het hygrothermisch gedrag van poreuze materialen ook in het belang van restauratiewerken is. Uit enkele onderzoeken bleek dat een restauratiemortel best zo compatibel mogelijk is met de verweerde historische mortel. Ook zou, op die manier, een cementmortel negatieve gevolgen hebben voor de vochthuishouding in de historische muren [6] [9] [10].

Hieruit leek het interessant de impact van een foutieve restauratie te onderzoeken. Door middel van experimenteel en numeriek onderzoek kan de impact op de vochthuishouding nagegaan worden van een restauratie met cementmortel. Zo kan worden nagegaan of er effectief een negatieve invloed aanwezig is, en, indien zo, hoe groot deze is.

|HOOFDSTUK 6: EXPERIMENTEEL ONDERZOEK

PARAGRAAF 1 | INLEIDING

PARAGRAAF 2 | CAPILLAIRE ABSORPTIEPROEF

PARAGRAAF 3 | POROSITEIT

Dit hoofdstuk behandelt het experimenteel luik van dit onderzoek. Zo zullen de uitgevoerde capillaire absorptieproef en de verwerking van de bekomen resultaten worden besproken.

PARAGRAAF 1: INLEIDING

1 | DOEL EN AANPAK

2 | VOORBEREIDING

Aan de hand van de literatuur [6] werd een selecte keuze aan morteltypes gemaakt. De specifieke keuze en de wijze van aanmaken wordt kort in deze paragraaf toegelicht.

1.1| DOEL EN AANPAK

Door middel van een capillaire absorptieproef wordt getracht een beter inzicht te krijgen in het vochtgedrag en de porositeit van verschillende morteltypes. Op die manier zullen deze eigenschappen enerzijds onderling kunnen vergeleken worden en anderzijds ten opzichte van een meer hedendaagse mortel. Met de bekomen resultaten zullen later kunnen worden gebuikt om een zo representatief mogelijk model te bekomen in Delphin.

1.2| VOORBEREIDING

1.2.1| MORTELKEUZE

Mortels kunnen worden ingedeeld volgens aggregaten en bindmiddelen (zie Hoofdstuk 2, paragraaf 1.2). Mortels kunnen op basis van bindmiddel in twee grote groepen worden ingedeeld: kalk- en cementmortels. Deze kunnen verder worden opgedeeld totdat er vijf mortelsoorten ontstaan: lucht-, hydraulische- en puzzolaankalkmortel, bastaardmortel en cementmortel. Dit zijn de meest gangbare mortelsoorten in Vlaanderen, zoals ook wordt weergegeven op figuur 2.5 [6].

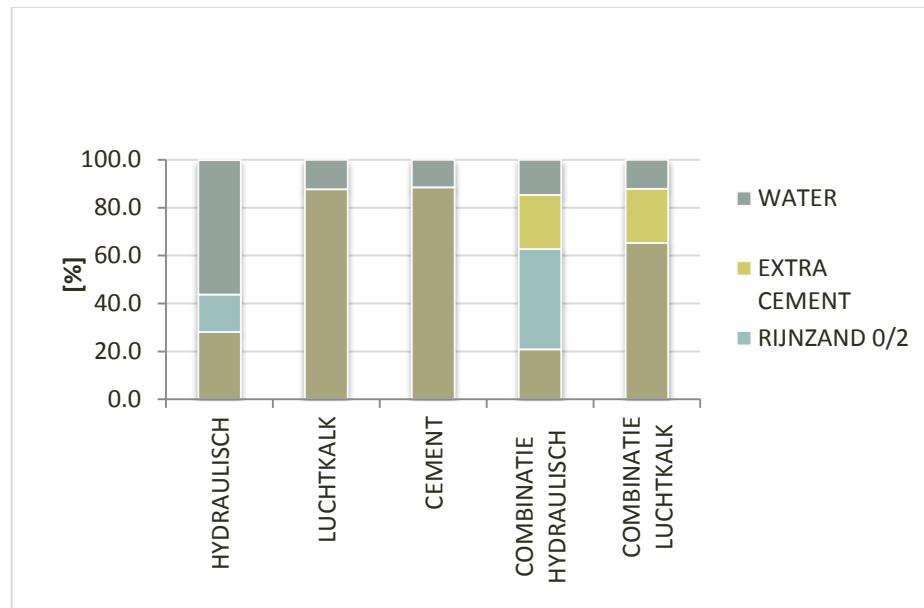
Om een representatieve uitslag van de proeven te bekomen werden testmortels gekozen op basis van bovenstaande indeling en werd hierbij gelet om de, in de praktijk, meest gangbare en gebruikte mortels aan te kopen. Door navraag bij een werfleider en bij de bedrijven zelf werden gangbare, en in België verkrijgbare, mortels verkregen. Er werd een luchtkalkmortel en cementmortel bij het Belgische bedrijf Cantillana NV verkregen, en een hydraulische kalkmortel aangekocht bij Remmers BVBA.

1.2.2| PROEFSTUKKEN

De mortelproefstukken werden aangemaakt overeenkomstig met norm NBN EN 1015-11 [33] in bekistingsbakjes met binnenafmetingen van 160 mm x 40 mm x 40 mm. De bekistingsbakjes werden, door middel van een paneelzaag, uit betonplex vervaardigd. Een tand en groef systeem liet een vlotte ontkisting toe. Het is een gebruikelijke techniek om betonplex in te strijken met minerale olie om een nog vlottere ontkisting te bekomen. Dit werd nu echter niet gedaan aangezien de olie in reactie kan gaan met de mortelspecie.

De bekistingsbakjes werden in twee keer gevuld met mortelspecie en telkens verdicht met 25 slagen van een stamper. Het overschot aan mortel werd afgestreken om gladde proefstukken te bekomen. Overeenkomstig met de norm [34] werden de proefstukken twee tot vijf dagen, afhankelijk van het bindmiddel, in een verzegelde polyethyleen zak bewaard. Na deze periode werden de proefstukken ontkist en gedroogd in een droogoven bij $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. De proefstukken werden droog beschouwd wanneer over een interval van 24 uur het massaverlies minder dan 0.2% van het initieel gewicht bedroeg. [34] Na het uitharden en drogen werden de proefstukken, teneinde een ruwer oppervlak te bekomen, in twee gebroken.

Van elke mortel werd ook een combinatie proefstuk gemaakt met cementmortel, dit om het verkeerdelijk gebruik van cementmortel bij restauratie van historische gevels met kalkgebonden mortels te simuleren. Na het uitharden en uitdrogen van de proefstukken op basis van kalkgebonden mortel werden ook deze in twee gebroken en nagevoegd met 2 cm cementmortel. De gecombineerde proefstukken werden opnieuw twee dagen in een polyethyleen zak bewaard en gedroogd in een droogoven. Figuur 6.1 toont de procentuele samenstelling van de verschillende proefstukken. In Bijlage A is de exacte samenstelling van de verschillende proefstukken opgenomen.



Figuur 6.1| Procentuele samenstelling van de proefstukken

PARAGRAAF 2: CAPILLAIRE ABSORPTIEPROEF

1 | PROEFOPSTELLING EN UITVOERING

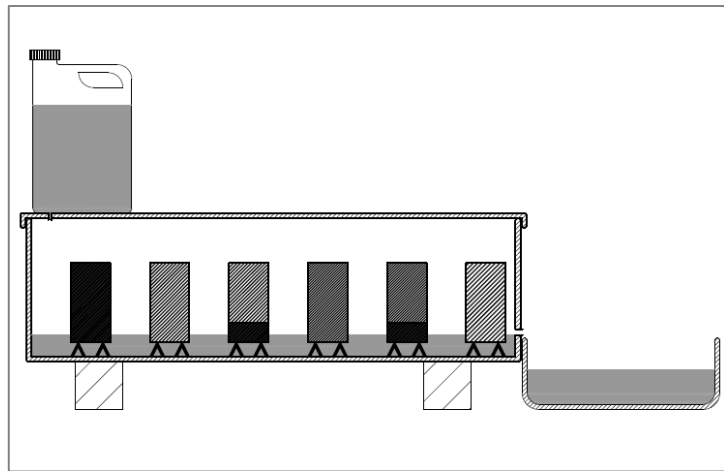
2 | RESULTATEN EN CONCLUSIES

In deze paragraaf wordt de wijze van uitvoering toegelicht. Ook zullen de resultaten kort worden besproken en eerste conclusies geformuleerd.

2.1| PROEFOPSTELLING EN UITVOERING

2.1.1| PROEFOPSTELLING

Wanneer de gebroken proefstukken droog konden worden beschouwd werden ze uit de oven gehaald en werd de test gestart. De proefstukken werden met de gebroken zijde, of de cementzijde in geval van een gecombineerd proefstuk, op pianoscharnieren in een waterbad, met constante diepte tussen 5 mm en 10 mm, geplaatst. Een horizontale en stabiele positie van de proefstukjes werd bekomen door middel van plastic stelblokjes. De diepte van het water werd constant gehouden door middel van een circulatiesysteem van het water. Een, in de zijkant geboord, gaatje liet het overtollige water toe over te stromen in een opvangbak. Aan de andere zijde van de bak kon nieuw water, via een trechtersysteem, druppelsgewijs in de bak komen. Op die manier werd het water voldoende vernieuwd en kon verontreiniging worden tegen gegaan. Een deksel creëerde een afgesloten klimaat en ging eventuele droging (door diffusie) van de proefstukken aan de lucht tegen. Figuur 6.2 toont deze proefopstelling.



Figuur 6.2| Proefopstelling capillaire absorptieproef

2.1.2| UITVOERING

Het gewicht van de mortels werd op regelmatige tijdstippen gemeten. De norm NBN EN 1015-18 rijkt een eerder eenvoudige formule aan om, aan de hand van de gewichtstoename over 90 minuten, de waterabsorptiecoëfficiënt van het materiaal te bepalen. Omdat dit bijzonder weinig accuraat is in vergelijking met de norm NBN EN 722-11 voor bakstenen waarbij de proefstukken na 2, 3, 5, 10, 15, 30, 60, 480, 1440 en 2880 minuten worden gemeten, werd gekozen voor een alternatief tijdsschema. Door deze ongelijkheid in beide normen werd geopteerd om de proefstukken initieel na 10, 30, 60 en 90 minuten te meten, en dan, in een tijdsinterval van zeven tot tien dagen, telkens om de 24 uur. Ter vergelijking werd de waterabsorptiecoëfficiënt ook volgens de, door de norm NBN EN 1015-18, aangereikte methode bepaald. [34] Wanneer de mortels werden gewogen, werden deze kort afgewreven met een katoenen doek en zo snel mogelijk terug in de besloten waterbak geplaatst. Door de gewichtstoename per contactoppervlak [kg/m^2] in functie van de tijd ($\sqrt{t}$ respectievelijk) uit te zetten werd een grafiek zoals op figuur 2.15 [4] bekomen en kon de waterabsorptiecoëfficiënt, A_w , van het materiaal uit de helling van het initiële lineaire deel van de grafiek bepaald worden. Ondertussen kon ook het capillair vochtgehalte, w_c , van het materiaal bepaald worden. Dit is het punt waarbij de eerste fase van het capillair absorberen van vocht overgaat in de tweede, tragere fase. Op de grafiek is dit het moment waarop het eerste lineaire deel van de grafiek overgaat in een tweede, eerder horizontaal, deel en kan dit als het knikpunt van de grafiek beschouwd worden.

Bij het ontkisten van enkele van de gecombineerde proefstukken bleek dat de hechting tussen beide mortels erg zwak was. Hierbij werd er geopteerd om de proef licht gewijzigd uit te voeren. Dit bleek het geval voor de combinaties met hydraulische mortel en twee proefstukken in combinatie met luchtkalkmortel. In deze gevallen werden de kalkmortels los op de cementmortel geplaatst in de waterbak. Hierbij werd gelet dat enkel de cementmortel in aanraking kwam met het wateroppervlak.

2.2| RESULTATEN EN CONCLUSIES

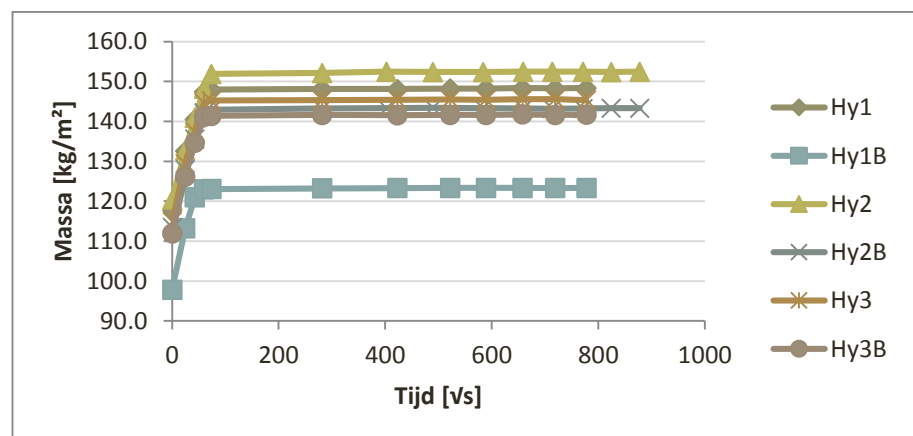
Na de capillaire absorptieproeven werd, ten gevolge van inconsistente metingen, de weegschaal geijkt aan de hand van verschillende ijkgewichten. Op die manier kon de afwijking op de weegschaal bepaald worden. Een weegschaal dient een lineair gedrag te hebben, een consistentie bij verschillende opeenvolgende metingen en een maximale afwijking van driemaal de resolutie te hebben. Bij weegschalen waarvan de resolutie niet gekend is, wordt de kleinste eenheid van de weegschaal als resolutie aangenomen. In dit geval bedraagt deze 0.1 g, en mag de maximale afwijking op de weegschaal 0.3 g zijn.

Na het ijkten van de weegschaal bleek dat de weegschaal geen consistent gedrag vertoonde en dat de afwijking bij zwaardere gewichten meer bedroeg dan de toelaatbare afwijking. In dit onderzoek wordt er echter gebruik gemaakt van massa's tussen 50 g en 300 g. In dit bereik blijkt de afwijking op de weegschaal wel onder 0.3 g te zijn, en kan aangenomen worden dat de gemeten waarden geloofwaardige resultaten zullen opleveren. In Bijlage A zijn de exacte resultaten van de ijking opgenomen.

2.2.1| RESULTATEN

| GRAFISCHE METHODE

De waterabsorptiecoëfficiënt en het capillair vochtgehalte werden bepaald op telkens zes proefstukken van de verschillende mortelsoorten. Er werden mortelproefstukken gemaakt op basis van luchtkalk, hydraulische kalk en cement. Deze werden respectievelijk voorgesteld door 'Lu', 'Hy' en 'C'. Van de kalkgebonden mortels werden nogmaals zes proefstukken gecombineerd met 2 cm cementmortel en gecodeerd als 'LuC' en 'HyC'. Voor alle 30 proefstukken werd de massatoename bepaald tot minimaal 192 uur (8 dagen) na de aanvang van de proef. De verkregen massa's per contactoppervlak werden uitgezet in functie van de vierkantswortel van de tijd. Uit het eerste lineair deel van de verkregen grafiek werd de waterabsorptiecoëfficiënt van het proefstuk bepaald. Uit het knikpunt van de grafiek kon het capillair vochtgehalte (het vochtgehalte waarop het vochtfront het uiteinde van het materiaal heeft bereikt en alle, niet ingesloten, poriën gevuld zijn met water) bepaald worden. Figuur 6.3 toont bij wijze van voorbeeld de bekomen absorptiecurve van de hydraulische kalkmortelproefstukken.



Figuur 6.3| Grafiek capillaire absorptieproef hydraulische kalkmortel

In het geval van de gecombineerde proefstukken met slechte aanhechting was het mogelijk om zowel de massatoename per contactoppervlak van het volledige proefstuk als van de onderdelen op zich op te meten. Op deze manier kon er achteraf niet enkel vergeleken worden tussen het origineel proefstuk en het proefstuk in combinatie met cementmortel, maar kon ook de invloed van beide mortels (in het gecombineerd proefstuk) onderling vergeleken worden.

| ANALYTISCHE METHODE

Ter vergelijking werd, naast bovenstaande grafische methode, de waterabsorptiecoëfficiënt ook volgens de door de norm NBN EN 1015-18 aangereikte methode bepaald. Deze stelt dat de waterabsorptiecoëfficiënt berekend kan worden uit de helling van de rechte die getrokken kan worden tussen de metingen op 90 minuten en 10 minuten:

$$A_w = 0.1 * (M_2 - M_1) \quad (6.1)$$

Waarbij

A_w de waterabsorptiecoëfficiënt van het materiaal [$\text{kg}/\text{m}^2\text{min}^{0.5}$],

M_1 het gewicht van het proefstuk na 10 minuten [g],

M_2 het gewicht van het proefstuk na 90 minuten [g].

Om consistentie van de eenheden te verzekeren kan formule (6.1) als volgt geschreven worden:

$$A_w = C * (M_2 - M_1) \quad (6.2)$$

Waarbij

A_w de waterabsorptiecoëfficiënt van het materiaal [$\text{kg}/\text{m}^2\text{min}^{0.5}$],

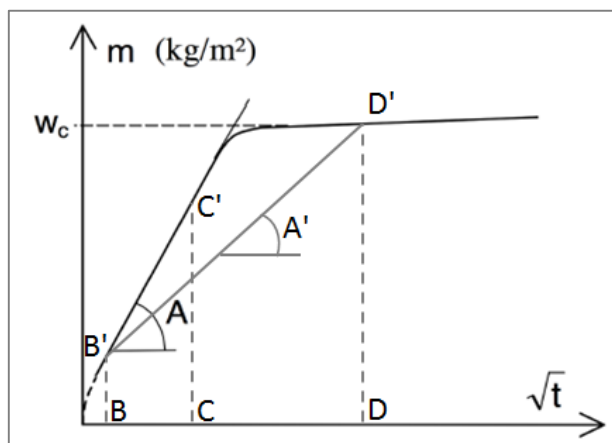
C een constante [$100 \text{ m}^2\text{min}^{-0.5}$],

M_1 het gewicht van het proefstuk na 10 minuten [kg],

M_2 het gewicht van het proefstuk na 90 minuten [kg].

Wanneer deze formule wordt nagerekend kan worden geconcludeerd dat, voor proefstukken met een contactoppervlak van $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ (0.0016 m^2), de constante $98.8 \text{ m}^2\text{min}^{-0.5}$ bedraagt, hetgeen benaderd wordt door de vooropgestelde constante van $100 \text{ m}^2\text{min}^{-0.5}$. De resultaten uit de grafische methode zullen echter vergeleken worden met de originele formule, waarbij de constante $100 \text{ m}^2\text{min}^{-0.5}$ bedraagt.

Er dient te worden opgemerkt dat de, met formule (6.2), berekende resultaten, in een ideale proef, maximaal even groot kunnen zijn als de resultaten bekomen via de grafische methode. Een voorbeeld in figuur 6.4 verduidelijkt dit principe. In het voorbeeld zijn twee mogelijke situaties weergegeven. In beide gevallen stelt punt B het moment voor na 10 minuten en B' het opgemeten gewicht na die 10 minuten. Punt C-C' en D-D' stellen elk een mogelijke positie voor het tijdstip en meetpunt na 90 minuten. De analytische methode zal, ongeacht de positie van het knikpunt, altijd gebruik maken van de helling tussen het meetpunt na 90 minuten (C' of D') en het meetpunt na 10 minuten (B'). Wanneer, in het geval van proefstukken met een hoge porositeit, het capillair vochtgehalte, en bijgevolg ook het knikpunt, bereikt is voor 90 minuten, zal de helling van de initiële absorptie (A) hoger zijn dan de helling van de rechte tussen het meetpunt na 90 minuten en het meetpunt na 10 minuten (A'). Op de figuur zal D' in dit geval het meetpunt na 90 minuten voorstellen. Wanneer het capillair vochtgehalte nog niet bereikt is na 90 minuten zal het meetpunt na 90 minuten kunnen worden voorgesteld door C' en zal de helling volgens grafische methode (A) gelijk zijn aan de helling tussen de meetpunten na 10 en 90 minuten (B'-C'). In de praktijk zal de helling bijgevolg volgens de analytische methode (A') altijd kleiner of gelijk aan de helling volgens de grafische methode (A) zijn.



Figuur 6.4| capillaire opzuiging door een materiaal met hoge porositeit

RESULTATEN

Tabellen 6.1 geven een overzicht van de waterabsorptiecoëfficiënt en het capillair vochtgehalte van de proefstukken. De waterabsorptiecoëfficiënt werd zowel grafisch als analytisch, overeenkomstig met de norm, berekend. Door de verhouding van de analytische resultaten op de grafische resultaten te bepalen, kunnen beide methodes vergeleken worden. De originele grafieken, verkregen uit de metingen, en precieze datapunten zijn opgenomen in Bijlage B.

Tabel 6.1-A| Overzicht resultaten grafische en analytische methode proefstukken

HYDRAULISCHE KALK				
Remmers KALK ®	A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	NBN A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	VERHOUDING [%]	w_c [kg/m ²]
Hy1	0.4939	0.3499	70.84	147.98
Hy1B	0.5513	0.2246	40.74	123.08
Hy2	0.4634	0.4067	87.76	152.10
Hy2B	0.5256	0.3189	60.67	142.78
Hy3	0.5355	0.3421	63.88	145.03
Hy3B	0.5386	0.3305	61.36	141.31
LUCHTKALK				
Cantillana Tradimur ®	A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	NBN A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	VERHOUDING [%]	w_c [kg/m ²]
Lu1	0.0386	0.0361	93.52	157.14
Lu1B	0.0371	0.0336	90.57	149.82
Lu2	0.0424	0.0310	73.11	175.95
Lu2B	0.0530	0.0374	70.57	130.35
Lu3	0.0434	0.0336	77.42	170.23
Lu3B	0.0446	0.0323	72.42	151.19
CEMENT				
Cantillana Mur 8/2 ®	A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	NBN A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	VERHOUDING [%]	w_c [kg/m ²]
C1	0.0395	0.0284	71.90	128.01
C1B	0.0503	0.0361	71.77	128.93
C2	0.0412	0.0323	78.40	123.90
C2B	0.0408	0.0323	79.17	129.81
C3	0.0540	0.0478	88.52	133.66
C3B	0.0449	0.0323	71.94	128.

Tabel 6.1-B| Overzicht resultaten grafische en analytische methode gecombineerde proefstukken

COMBINATIES				
Met hydraulische kalk	A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	NBN A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	VERHOUDING [%]	w_c [kg/m ²]
HyC1	0.1144	0.0930	81.29	172.23
HyC1B	0.4520	0.3460	76.16	168.16
HyC2	0.4196	0.4428	105.5	165.04
HyC2B	0.4449	0.5874	132.0	179.01
HyC3	0.2653	0.2969	111.9	173.87
HyC3B	0.2242	0.2427	108.3	162.16
Met luchtkalk	A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	NBN A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	VERHOUDING [%]	w_c [kg/m ²]
LuC1	0.1251	0.0232	18.55	173.36
LuC1B	0.1268	0.0258	20.35	170.05
LuC2	0.1342	0.0426	31.74	168.07
LuC2B	0.1181	0.0323	27.35	171.83
LuC3	0.1609	0.0426	26.48	177.77
LuC3B	0.1179	0.0413	35.03	163.43

Tabel 6.1-C| Overzicht resultaten grafische en analytische methode onderdelen gecombineerde proefstukken

ONDERDELEN VAN COMBINATIES			
Met hydraulische kalk	A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	NBN A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	VERHOUDING [%]
HyC1	0.1144	0.0930	81.29
Hy	0.0611	0.0917	150.1
C	0.0910	0.0013	1.429
HyC1B	0.4543	0.3460	76.16
Hy	0.3957	0.3537	89.39
C	0.0858	0.0052	6.061
HyC2	0.4196	0.4428	105.5
Hy	0.3616	0.4402	121.7
C	0.0985	0.0026	2.640
HyC2B	0.4449	0.5874	132.0
Hy	0.4256	0.5822	136.8
C	0.0796	0.0052	6.533
HyC3	0.2653	0.2969	111.9
Hy	0.2283	0.2943	128.9
C	0.0722	0.0026	3.601
HyC3B	0.2242	0.2427	108.3
Hy	0.1817	0.2401	132.1
C	0.0845	0.0026	3.077
Met luchtkalk	A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	NBN A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	VERHOUDING [%]
LuC2B	0.1181	0.0323	27.35
Lu	0.0298	0.0258	80.37
C	0.0839	0.0065	7.747
LuC3B	0.1179	0.0413	35.03
Lu	0.0304	0.0361	118.8
C	0.0933	0.0052	5.573

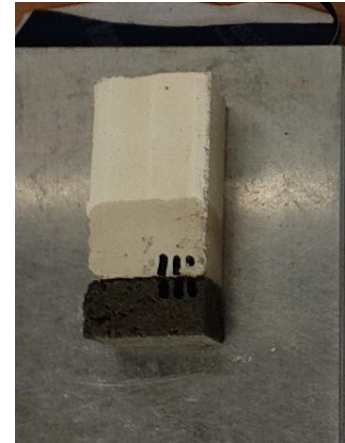
| Opmerkingen

Vooreerst moet er rekening worden gehouden met de gewijzigde proefopstelling in het geval van de gecombineerde proefstukken met slechte hechting. Aangezien beide mortels in deze gevallen los op elkaar zijn geplaatst kan het mogelijk zijn dat de proef foutieve waarden oplevert. Het valt te verwachten dat de cementmortel het water zal blokkeren en dat er in het beginstadium een lichte massatoename is van de cementmortel. Na enige tijd, wanneer deze gesatureerd is, zal de kalkmortel ook vocht absorberen. Er dient te worden vermeden dat de kalkmortel, tijdens de proef of bij het in en uit het water halen voor metingen, in contact komt met het wateroppervlak. Daarnaast zullen, door de minder goede hechting, beide mortels niet in vol contact staan met elkaar. Ook dit kan leiden tot lichte wijzigingen in de metingen.

Ook dient te worden opgemerkt dat het capillair vochtgehalte niet bij elk proefstuk even accuraat kon worden bepaald. Het capillair vochtgehalte, w_c , van het materiaal wordt bepaald als het vochtgehalte waarop de eerste fase van het capillair absorberen van vocht (initiële absorptie) overgaat in secundaire absorptiefase. De secundaire absorptie is voltooid wanneer alle resterende lege poriën opgevuld zijn, en het verzadigingsvochtgehalte, w_{sat} , is bereikt. Op dat moment kan de lijn van secundaire absorptie exact bepaald worden. Zolang het verzadigingsvochtgehalte niet bereikt is, blijft de lijn een benadering. Aangezien niet alle proefstukken hun verzadigingsvochtgehalte hebben bereikt, zal het capillair vochtgehalte van deze proefstukken minder accuraat zijn. Er werd er echter wel voor gezorgd dat in deze gevallen genoeg datapunten van de secundaire fase opgemeten waren zodat het capillair vochtgehalte zo goed mogelijk benaderd kon worden.

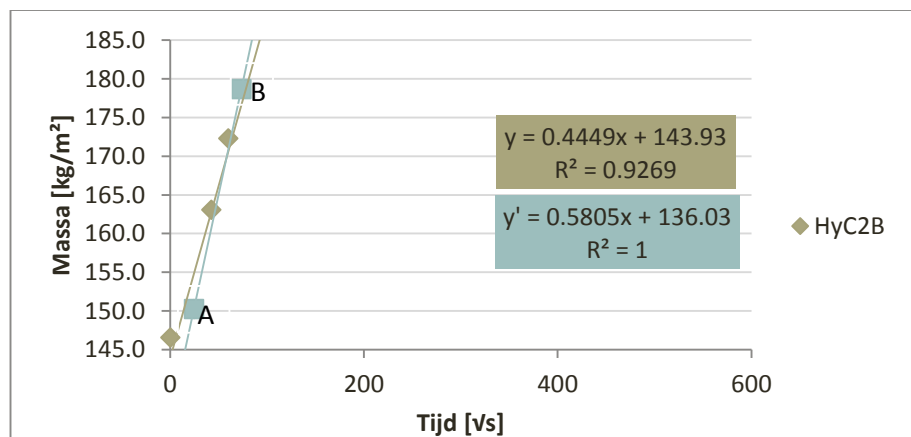
Als laatste werd opgemerkt dat, bij het berekenen van de waterabsorptiecoëfficiënt van de gecombineerde proefstukken, bleek dat de resultaten bekomen via de analytische methode af en toe toch hoger waren dan deze bekomen via de grafische methode. Deze vallen, afhankelijk van de kalkmortel, op verschillende wijzen te verklaren. Zoals aangetoond op figuur 6.4 kan, in een ideale proef, wanneer de coëfficiënt berekend wordt op basis van de meetpunten na 10 en 90 minuten, deze maximaal even groot zijn als wanneer deze berekend wordt uit de helling van het initiële lineaire deel van de grafiek. In het experimenteel onderzoek is het echter niet altijd mogelijk een perfect lineair verband te vinden tussen de eerste meetpunten. Dit omdat het water niet altijd aan een constante snelheid wordt opgenomen. Wanneer de datapunten geen perfect lineair verband hebben, maar er wel een lineaire trendlijn wordt gebruikt (zoals hier de methode was), zullen niet alle datapunten op deze trendlijn liggen.

Zo ligt het meetpunt na 10 minuten, in het geval van combinaties met hydraulische kalk, algemeen rechts naast de trendlijn, en het meetpunt na 90 minuten links. Dit doet zich voor wanneer ook de hydraulische kalkmortel water absorbeert gedurende de eerste minuten van de proef. Aangezien deze mortel, wanneer niet gecombineerd, een grote waterabsorptiecoëfficiënt heeft, betekent dat dat deze proefstukken snel vocht zullen absorberen en het vochtfront relatief snel het uiteinde van het proefstuk zal bereiken. Dit resulteert in een proefstuk waarbij de massatoename gedurende de eerste tien minuten van de proef groter is dan tijdens het daaropvolgende uur. In deze gevallen is de absorptie van het vocht na 10 minuten al duidelijk waarneembaar op het proefstuk zelf, zoals getoond in figuur 6.5.



Figuur 6.5| Waterabsorptie HyC na 10 minuten

Figuur 6.6 toont bij wijze van voorbeeld de absorptiecurve van proefstuk HyC2B. De eerste vijf meetpunten werden uitgezet waardoor een lineaire trendlijn (y) werd getrokken (volgens de grafische methode). In dit geval is te zien dat het meetpunt na 10 minuten (A) rechts en het meetpunt na 90 minuten (B) links van de trendlijn (y) gelegen is. Wanneer er echter een rechte getrokken wordt door de meetpunten na 10 en 90 minuten (volgens de analytische methode) wordt rechte y' bekomen. Op de grafiek is duidelijk te zien dat de helling van deze trendlijn groter is dan die van rechte y .



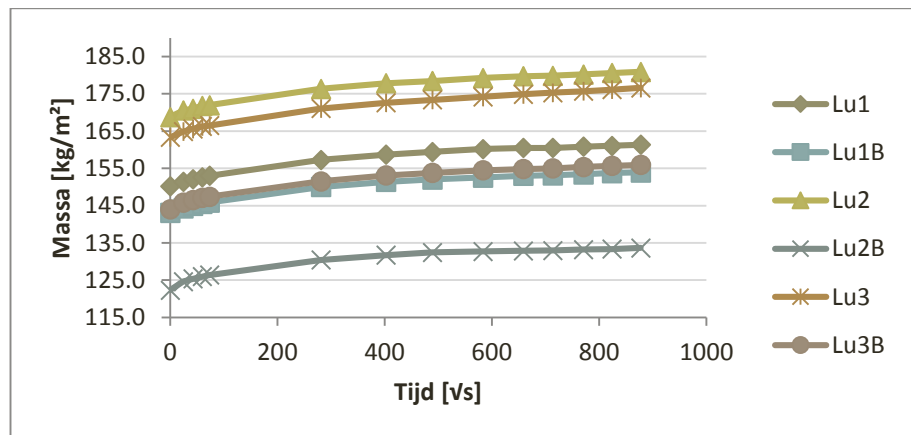
Figuur 6.6| Vergelijking beide methodes voor waterabsorptiecoëfficiënt HyC2B

In het geval van de gecombineerde luchtkalkmortels blijkt zich een ander fenomeen voor te doen. Hier wordt het knikpunt van de curve al bereikt tijdens de eerste 60 minuten van de proef. Hierdoor valt het meetpunt na 90 minuten buiten het initiële lineaire deel en zijn de resultaten volgens de analytische methode (zoals verduidelijkt door figuur 6.4) veel lager dan deze bekomen door de grafische methode. Er zou kunnen geconcludeerd worden dat in deze gevallen de cementmortel wel een buffer vormt en zo de luchtkalkmortel wordt belet water te absorberen. De cementschijfjes zelf blijken telkens een gelijkaardige absorptiecurve te hebben.

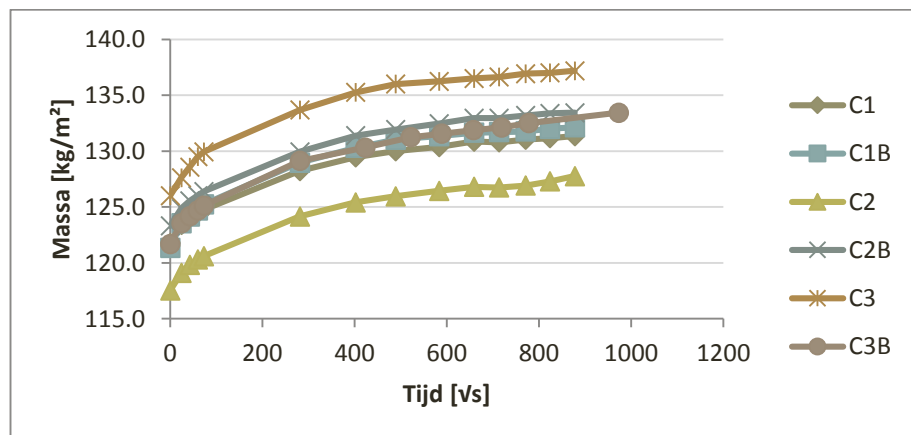
2.2.2| CONCLUSIES

Na het uitvoeren van de capillaire absorptieproef voor de verschillende types mortel, zowel puur als gecombineerd met cementmortel, kunnen enkele conclusies getrokken worden.

Ten eerste dient te worden opgemerkt dat de absorptiegrafieken van de pure proefstukken, binnen een morteltype, gelijke trend vertonen. Dit duidt op consistent gedrag en een consistente aanmaak van de mortel. Figuren 6.3, 6.7 en 6.8 tonen de absorptiegrafieken voor respectievelijk hydraulische kalkmortel, luchtkalkmortel en cementmortel. Bij de gecombineerde mortelstukken blijken niet alle proefstukken gelijke trend te vertonen. Dit is het gevolg van slechte hechting tussen de cement- en kalkmortel.



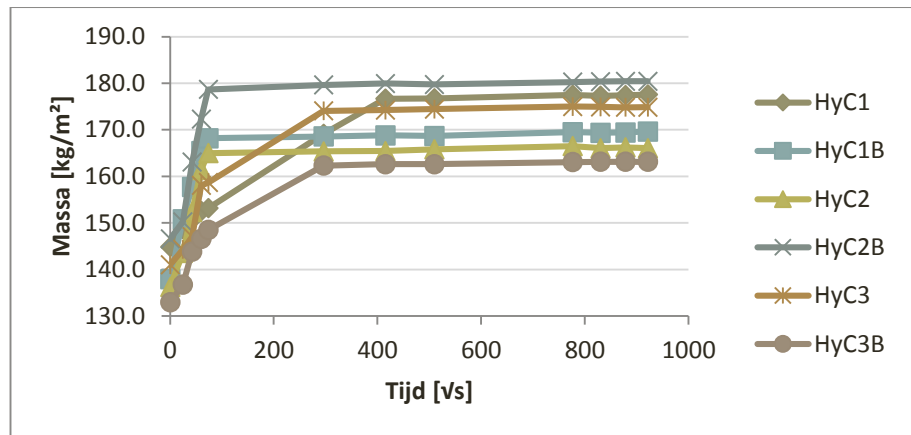
Figuur 6.7| Grafiek capillaire absorptieproef luchtkalkmortel



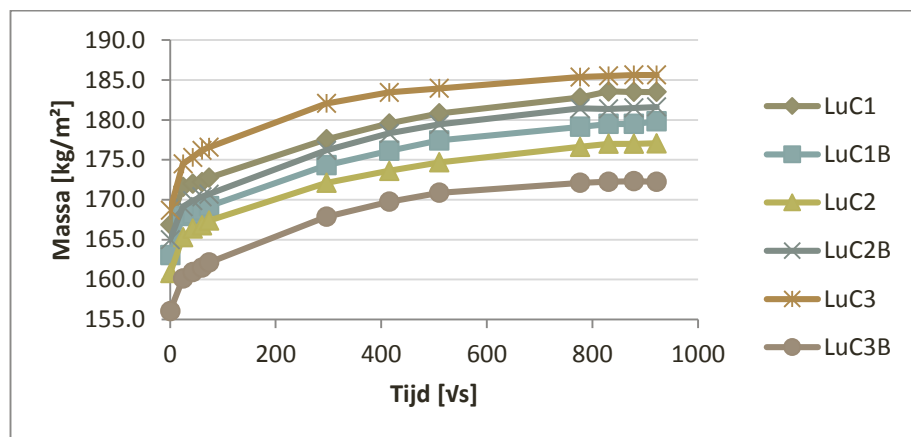
Figuur 6.8| Grafiek capillaire absorptieproef cementmortel

Wanneer de absorptiecurves van de verschillende pure proefstukken worden vergeleken, kan het vochtgedrag en de porositeit eenvoudig geschat en vergeleken worden. Zo blijkt kalkmortel sneller water aan te zuigen dan cementmortel. Dit was te verwachten aangezien kalk een poreuzer materiaal is dan cement. Een bastaardmortel, in dit geval luchtkalk, blijkt zich gelijkaardig te gedragen aan cementmortel. In dit geval heeft de luchtkalkmortel een lagere waterabsorptiecoëfficiënt dan de cementmortel. Het verschil is echter minimaal. Deze onderlinge verhoudingen zijn ook te zien aan het moment waarop het capillair vochtgehalte wordt bereikt. Deze wordt eerder bereikt voor hydraulische kalkmortel (binnen het eerste uur) dan voor luchtkalk- en cementmortel (na 7 uur en 5.7 uur).

Bij de gecombineerde proefstukken blijkt, zoals verwacht, gecombineerde hydraulische kalk opnieuw een grotere aanzuiging te hebben dan gecombineerde luchtkalk. Ook is te zien dat, ten gevolge van de slechte hechting, bij enkele proefstukken de absorptiegrafiek afwijkt. Dit is het geval voor HyC1B, HyC2 en HyC2B. Figuren 6.9 en 6.10 geven de absorptiegrafieken voor de gecombineerde hydraulische kalkmortel en luchtkalkmortel.



Figuur 6.9| Grafiek capillaire absorptieproef combinatie met hydraulische kalkmortel



Figuur 6.10| Grafiek capillaire absorptieproef combinatie met luchtkalkmortel

In het geval van de proefstukken waarbij de hechting tussen cement- en kalkmortel niet optimaal is, was het mogelijk de waterabsorptie van de onderdelen apart te bekijken. Hierbij blijkt al snel dat de cementblokjes een gemiddelde waterabsorptiecoëfficiënt van $0.0861 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0.5}$ hebben, hetgeen lager is dan de coëfficiënt van de cementmortel op zich. Daarnaast kan worden opgemerkt dat de totale waterabsorptiecoëfficiënt van de gecombineerde proefstukken de coëfficiënt van het onderdeel aan kalkmortel volgen. In het geval van hydraulische kalkmortel ligt deze van het gecombineerde proefstuk iets hoger, bij luchtkalk iets lager. Ook blijkt de gevonden waterabsorptie van het onderdeel aan luchtkalk sneller te verlopen dan in het geval van de pure proefstukken.

Wanneer de gecombineerde proefstukken worden vergeleken met de pure proefstukken blijkt al snel dat de cementmortel weldegelijk een invloed heeft op het vochtgedrag van de kalkmortel. In het geval van de hydraulische kalkmortel vormt het cement een waterdichte barrière. Dat is zichtbaar (in het geval dat de hechting tussen beide mortels groot genoeg is) aan de vertraagde waterabsorptie. In een eerste deel zuigt alleen de cementmortel water aan. Van zodra deze zijn verzadigd vochtgehalte bereikt, neemt ook de hydraulische kalkmortel langzaam vocht op. Bij de luchtkalkmortel zorgt het cement, aangezien deze een hogere absorptiecoëfficiënt heeft, ervoor dat de waterabsorptie in het gecombineerd proefstuk sneller verloopt.

De inconsistentie in de resultaten van de gecombineerde proefstukken is te wijten aan de nodige handelingen bij het wegen van de proefstukken. Hierbij wordt het proefstuk voorzichtig uit de bak genomen en worden beide onderdelen gewogen. Hierbij kan het gebeuren dat beide onderdelen ten opzichte van elkaar verschuiven.

PARAGRAAF 3: POROSITEIT

1 | CAPILLAIRE POROSITEIT

2 | EFFECTIEVE POROSITEIT

3 | OPEN POROSITEIT

4 | OVERZICHT

De mate waarin een materiaal holtes en poriën bevat verschilt onderling voor poreuze materialen. Deze verhouding van volumes holtes en materiaal kan worden uitgedrukt door middel van de 'porositeit' van het materiaal. Met de bekomen waardes uit de capillaire absorptieproef kan de porositeit voor de verschillende mortels berekend worden. Dit helpt bij het opstellen van een representatief model in Delphin.

In Delphin wordt een onderscheid gemaakt tussen capillaire, effectieve en open porositeit. Deze porositeiten zullen kort worden besproken en uitgerekend voor de verschillende mortels. [51]

3.1| CAPILLAIRE POROSITEIT

De capillaire porositeit wordt door Delphin gedefinieerd als de porositeit op korte termijn. Bij deze berekening wordt gebruik gemaakt van de bekomen waarden bij het capillair verzadigd vochtgehalte. De capillaire porositeit wordt benaderend berekend als volgt:

$$f_{cap} = \frac{m_{cap} - m_{droog}}{m_{cap}} \quad (6.3)$$

Waarbij

f_{cap} de capillaire porositeit [kg/kg],

m_{cap} het gewicht bij het capillair verzadigd vochtgehalte [kg],

m_{droog} het gewicht van het proefstuk uit de droogoven [kg].

3.2| EFFECTIEVE POROSITEIT

De effectieve porositeit wordt door Delphin gedefinieerd als de porositeit op lange termijn. Bij deze berekening wordt gebruik gemaakt van de bekomen waarden bij het effectief verzadigd vochtgehalte. De effectieve porositeit wordt benaderend berekend als volgt:

$$f_{eff} = \frac{m_{eff} - m_{droog}}{m_{eff}} \quad (6.4)$$

Waarbij

f_{eff} de effectieve porositeit [kg/kg],

m_{eff} het gewicht bij het effectief verzadigd vochtgehalte [kg],

m_{droog} het gewicht van het proefstuk uit de droogoven [kg].

3.3| OPEN POROSITEIT

In Delphin wordt ook gebruik gemaakt van de open porositeit bij poreuze materialen. Deze open porositeit kan gedefinieerd worden als het volume waarin stroming van vloeibaar vocht effectief kan plaatsvinden. Dit kan gravimetrisch bepaald worden door middel van het gewicht van het proefstuk in droge en natte staat: [51]

$$f = \frac{m_s - m_d}{V \cdot \rho_w} \quad (6.5)$$

Waarbij

f de open porositeit [kg/kg],

m_s het gewicht bij het verzadigd vochtgehalte [kg],

m_d het gewicht van het proefstuk uit de droogoven [kg],

V het volume van het proefstuk [m³],

ρ_w de dichtheid van het water [kg/m³].

Het volume van het proefstuk wordt berekend uit het contactoppervlak en de hoogte van het proefstuk. Door de onregelmatige vorm van de proefstukken werd voor elke ribbe de hoogte bepaald en daarvan het gemiddelde berekend. [51]

3.4| OVERZICHT

In Bijlage C zijn de berekeningstabellen van de dichtheid en verschillende porositeiten van de verschillende proefstukken bijgevoegd. Tabel 6.2 geeft een overzicht weer.

Tabel 6.2-A| Overzicht resultaten porositeit proefstukken

HYDRAULISCHE KALK			
Remmers KALK ®	f_{cap} [kg/kg]	f_{eff} [kg/kg]	f [kg/kg]
Hy1	0.201	0.206	0.379
Hy1B	0.192	0.207	0.384
Hy2	0.188	0.211	0.404
Hy2B	0.165	0.209	0.386
Hy3	0.164	0.210	0.375
Hy3B	0.169	0.210	0.385
LUCHTKALK			
Cantillana Tradimur ®	f_{cap} [kg/kg]	f_{eff} [kg/kg]	f [kg/kg]
Lu1	0.019	0.070	0.137
Lu1B	0.021	0.072	0.140
Lu2	0.018	0.067	0.129
Lu2B	0.033	0.085	0.163
Lu3	0.020	0.076	0.159
Lu3B	0.022	0.076	0.152
CEMENT			
Cantillana Mur 8/2 ®	f_{cap} [kg/kg]	f_{eff} [kg/kg]	f [kg/kg]
C1	0.023	0.072	0.117
C1B	0.032	0.083	0.138
C2	0.026	0.081	0.130
C2B	0.025	0.077	0.126
C3	0.032	0.083	0.138
C3B	0.027	0.088	0.149

Tabel 6.2-B| Overzicht resultaten porositeit gecombineerde proefstukken

COMBINATIES			
Met hydraulische kalk	f_{cap} [kg/kg]	f_{eff} [kg/kg]	f [kg/kg]
HyC1	0.055	0.184	0.356
HyC1B	0.165	0.186	0.359
HyC2	0.156	0.180	0.343
HyC2B	0.151	0.189	0.383
HyC3	0.112	0.194	0.358
HyC3B	0.103	0.183	0.354
Met luchtkalk	f_{cap} [kg/kg]	f_{eff} [kg/kg]	f [kg/kg]
LuC1	0.031	0.092	0.184
LuC1B	0.032	0.094	0.185
LuC2	0.033	0.092	0.177
LuC2B	0.028	0.091	0.182
LuC3	0.039	0.092	0.178
LuC3B	0.030	0.094	0.183

|HOOFDSTUK 7: ONDERZOEK IN DELPHIN

PARAGRAAF 1 | UITVOERING IN DELPHIN

PARAGRAAF 2 | REFERENTIE MODELLEN

PARAGRAAF 3 | COMPOSITIE MODELLEN

PARAGRAAF 4 | MASSIEVE MUUR MODELLEN

PARAGRAAF 5 | CONCLUSIES

Dit hoofdstuk behandelt het numeriek luik van dit onderzoek. Zo zullen de verschillende simulaties en diens resultaten toegelicht worden.

PARAGRAAF 1: UITVOERING IN DELPHIN

1 | DOEL EN AANPAK

2 | MATERIAAL DATA

In deze paragraaf worden het doel en de wijze van simuleren besproken. Ook worden de gebruikte materialen en hun eigenschappen kort toegelicht.

1.1| DOEL EN AANPAK

In dit onderzoek worden drie types constructies gesimuleerd. In alle gevallen wordt de linkerkant van de constructie als buitenomgeving, of wateroppervlak, beschouwd en de rechterkant als binnenomgeving. De onder- en bovenkant kunnen, in het geval van gesimuleerde laboproeven, als binnenomgeving, of, in het geval van een gesimuleerd onderdeel van de muur, als muur worden beschouwd.

In een eerste deel wordt een capillaire absorptieproef in labo-omstandigheden nagebootst. Hiervoor worden eenvoudige mortelproefstukken en mortelvoegen 1D gesimuleerd. De linkerzijde grenst hierbij aan een wateroppervlak en de overige zijdes aan de binnenomgeving. Uit deze simulaties kunnen de eigenschappen van de mortels onderling en met de, uit de experimenten, bekomen resultaten vergeleken worden. Ook kan een eerste vergelijk gemaakt worden met de situatie waarin de mortel 'foutief' wordt gerestaureerd met cementmortel.

In een tweede deel wordt een compositie van twee gemetste bakstenen gesimuleerd. Er worden telkens twee gelijke stenen met een laag mortel 2D gesimuleerd. De mortels worden telkens met drie verschillende bakstenen gecombineerd. De stenen zijn zo gekozen dat de mortels telkens worden gecombineerd met een steen met gelijkaardige, een beduidend hogere en beduidend lagere waterabsorptiecoëfficiënt. Hierbij wordt de grensweerstand voor elke combinatie van mortel en baksteen, in labo-omstandigheden, gevarieerd tussen 0 m/s, $1 \cdot 10^{10}$ m/s, $3 \cdot 10^{10}$ m/s en $5 \cdot 10^{10}$ m/s. Uit deze korte simulaties kan de impact van de grootte van de grensweerstand bepaald worden.

In een derde en laatste deel wordt een realistische massieve muur gesimuleerd. Met behulp van de bekomen resultaten uit de eerste twee delen simulaties worden enkele, aan reële klimaatdata blootgestelde, massieve muren gesimuleerd. Door deze simulaties te vergelijken met een homogene baksteenwand, met zelfde afmetingen en randvoorwaarden, kan bepaald worden wat de impact is van de gesimuleerde mortellaag. Ook kan de invloed van de stootvoegen bepaald worden. Daarnaast wordt er aan de binnenzijde van de muur een pleisterlaag aangebracht. Door middel van extra simulaties op bepaalde punten op deze pleisterlaag kan de mould index aan de binnenzijde van de wand bepaald worden. Deze waarde biedt een inzicht op de kwaliteit van de wand. Op die manier wordt een beter inzicht verworven inzake de invloed van mortel en baksteen op elkaar en de impact van mortel- en steenkeuze bij restauraties.

1.2| MATERIAAL DATA

In dit onderzoek wordt, voor de simulaties in Delphin, gebruik gemaakt van de bekomen resultaten uit de voorafgaande experimenten. Er wordt telkens uitgegaan van een zo goed mogelijk, in de database beschikbare, benaderende mortel. Deze wordt vervolgens aangepast naar de experimenteel bepaalde eigenschappen hetgeen de integriteit van de simulaties verhoogt.

Delphin5 beschrijft materialen door middel van enkele eigenschappen: de dichtheid, de porositeit, de warmtegeleidbaarheid, de waterabsorptiecoëfficiënt en het diffusieweerstandsgetal. Uit de capillaire waterabsorptieproef kan de dichtheid, de porositeit en de waterabsorptiecoëfficiënt bepaald worden voor elk mortelproefstuk. Deze worden uitgemiddeld per type mortel. Voor het diffusieweerstandsgetal wordt gebruik gemaakt van algemene waardes per type mortel, zoals weergegeven in tabel 6.2.

In Bijlage C zijn de berekeningstabellen van de verschillende materiaaleigenschappen per proefstuk weergegeven. Tabel 7.1 geeft een overzicht van de, in Delphin, ingevoerde waardes weer.

Tabel 7.1| Overzicht gebruikte materiaaldata

MATERIAAL DATA						
MORTELS	ρ [kg/m ³]	f_{cap} [kg/kg]	f_{eff} [kg/kg]	f [kg/kg]	A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	μ [-]
HYDRAULISCHE KALK	1459.30	0.180	0.209	0.386	0.518	10
LUCHTKALK	1827.33	0.022	0.074	0.147	0.043	10
CEMENT	1517.06	0.028	0.081	0.133	0.045	13
COMBINATIEMORTELS	ρ [kg/m ³]	f_{cap} [kg/kg]	f_{eff} [kg/kg]	f [kg/kg]	A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	μ [-]
MET HYDRAULISCHE KALK	1568.58	0.124	0.186	0.359	0.320	-
MET LUCHTKALK	1782.15	0.032	0.092	0.181	0.131	-

PARAGRAAF 2: REFERENTIE MODELLEN

1 | OPSTELLING

2 | VOORWAARDEN EN OUTPUTS

3 | SIMULATIES

4 | CONCLUSIES

In deze paragraaf worden de opstelling en resultaten van het eerste deel aan simulaties kort toegelicht. Met de resultaten van dit deel kunnen de verschillende mortels onderling vergeleken worden en wordt een eerste inzicht verworven in de invloed van een foutieve restauratiemortel.

2.1| OPSTELLING

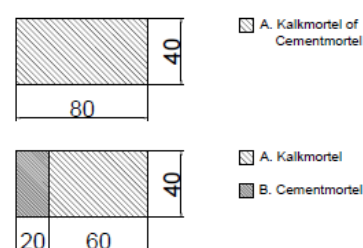
In dit eerste deel wordt, aan de hand van het simuleren van mortelproefstukken een capillaire absorptieproef nagebootst. Voor elk type mortel wordt zowel een proefstuk (40 mm x 40 mm x 80 mm) als een voeg (10 mm x 90 mm x 190 mm) gesimuleerd. Het simuleren van de voeg dient als extra staving van de, bij de proefstukken, bekomen resultaten. Hierbij worden kleine verschillen in waardes verwacht door het verschil in geometrie. De evolutie van het vochtgehalte wordt echter gelijklopend verwacht.

Om het verkeerdelijk restaureren met cementmortel na te bootsen zullen ook gecombineerde proefstukken worden gesimuleerd. Bij het combineren kan worden aangenomen dat er zich een grensweerstand voordoet tussen de restauratiemortel en de kalkmortel. In deze thesis wordt aangenomen dat de grensweerstand tussen de mortels dezelfde is als die tussen baksteen en mortel. Er worden simulaties, voor zowel de voeg als het proefstuk, gemaakt waarbij deze grensweerstand wordt genegeerd ('perfect') en enkele waarbij ze wel in rekening wordt gebracht. Daarbij wordt een vergelijking gemaakt van 1.10^{10} m/s, 3.10^{10} m/s en 5.10^{10} m/s. In de literatuur [48] [50] wordt respectievelijk voor 'wet cured' mortel en 'dry cured' mortel gebruik gemaakt van een grensweerstand van $1.25.10^{10}$ m/s en $2.50.10^{10}$ m/s, en, $2.50.10^{10}$ m/s en $5.0.10^{10}$ m/s met stenen. In realiteit zal de grensweerstand tussen beide waarden liggen. Omdat er een tegenstrijdigheid is, wordt, in deze thesis, de grensweerstand stapsgewijs gesimuleerd. Tabel 7.2 toont een overzicht van de gedane simulaties.

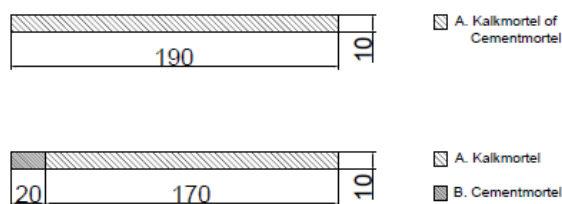
Tabel 7.2| Overzicht 32 simulaties referentie modellen.

SIMULATIES REFERENTIE MODELLEN		MORTEL				
		Proefstuk	Combinatie			
MORTEL			Perfect	1.10 ¹⁰ m/s	3.10 ¹⁰ m/s	5.10 ¹⁰ m/s
Hydraulische Kalkmortel	Proefstuk	x	x	x	x	x
	Voeg	x	x	x	x	x
Luchtkalkmortel	Proefstuk	x	x	x	x	x
	Voeg	x	x	x	x	x
Historische Kalkmortel	Proefstuk	x	x	x	x	x
	Voeg	x	x	x	x	x
Cementmortel	Proefstuk	x				
	Voeg	x				

Figuur 7.1 toont de gebruikte opstellingen in Delphin voor de verschillende simulaties, zoals in tabel 7.2 samengevat. Er worden pure mortels en gecombineerde mortels gesimuleerd, zowel in de vorm van een, zoals in de norm NBN EN 1015-11 [33] bepaald, proefstuk, als in de vorm van een realistische voeg. Bij dit deel simulaties wordt de linkerkant van de constructie als wateroppervlak beschouwd. Het proefstuk is aan de overige zijdes blootgesteld aan de binnenomgeving.



Figuur 7.1-A| Opstelling referentiemodel mortel proefstuk [mm]



Figuur 7.1-B| Opstelling referentiemodel mortel voeg [mm]

2.2| VOORWAARDEN EN OUTPUTS

2.2.1| OUTPUTS

Het vochtgehalte [kg/m^3] wordt, in functie van de tijd, uitgezet voor de gehele proefstukken. In deze simulaties wordt, om een waterabsorptieproef zo goed mogelijk te benaderen, gebruik gemaakt van een aangepast tijdschema. Gedurende de eerste 2 uur wordt een tijdsstap van 5 minuten gehanteerd, daarna wordt, voor een periode van 24 uur, een tijdsstap van 1 uur gehanteerd, en, bij wijze van opvolging, als laatste, gedurende een periode van 10 dagen, een tijdsstap van 1 dag.

2.2.2| VOORWAARDEN

| RANDVOORWAARDEN

Buitenomgeving (wateroppervlak):

10°C watertemperatuur

10 mm pressure head

Binnenomgeving (labo-omstandigheden):

18°C omgevingstemperatuur

55% relatieve vochtigheid

| INITIËLE VOORWAARDEN

De mortelproefstukken komen uit de droogoven en zijn een uur geklimatiseerd in het labo:

30°C temperatuur

0% relatieve vochtigheid

0 kg vochtgehalte

| CONTACTVOORWAARDEN

In het geval van gecombineerde proefstukken (waarbij een foute renovatie gesimuleerd wordt door 2 cm cementmortel) wordt de grensweerstand tussen beide mortels stapsgewijs gesimuleerd:

0.10^{10} m/s (perfect contactoppervlak tussen beide materialen)

1.10^{10} m/s

3.10^{10} m/s

5.10^{10} m/s

2.3| SIMULATIES

In wat volgt wordt een selectie aan simulatieresultaten besproken ter staving van de getrokken conclusies. Een uitgebreide selectie van de resultaten werd bijgesloten in Bijlage E.

2.3.1| TEMPERATUUR PROEFSTUKKEN

Ter volledigheid werd ook de temperatuur over de gehele proefstukken uitgezet in functie van de tijd. In Bijlage E zijn de resultaten van dit onderzoek bijgevoegd.

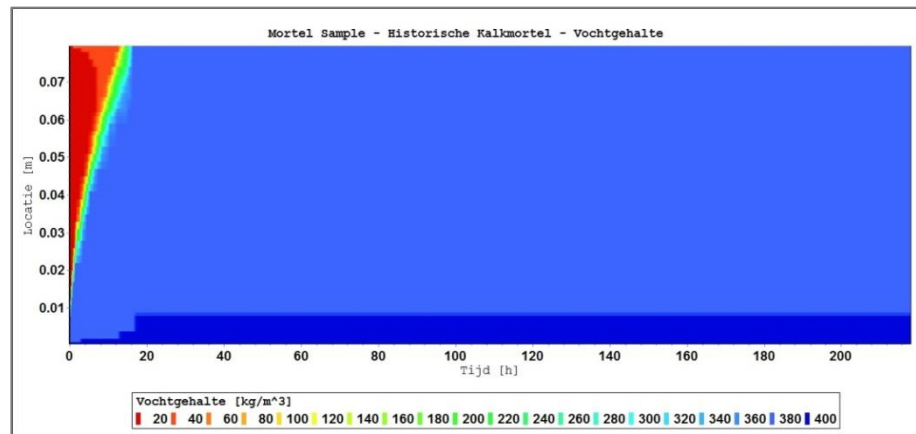
Uit de resultaten kan worden opgemerkt dat het temperatuursverloop gelijkaardig is voor de verschillende proefstukken (zowel puur als gecombineerd). Daarbij blijkt dat de temperatuur sneller afneemt in pure proefstukken dan in gecombineerde proefstukken. Wanneer gekeken wordt naar het temperatuursverloop in de gecombineerde proefstukken, en deze voor verschillende grensweerstanden wordt uitgezet in de tijd, blijkt dat er een verschil in temperatuursverloop optreedt tussen de situatie zonder grensweerstand en deze waarin wel een grensweerstand werd toegekend. De waarde van de grensweerstand blijkt geen grote impact te hebben. Bij wijze van extra staving werden

de simulaties van de proefstukken vergeleken met deze van de voegen. Zoals verwacht blijkt het temperatuursverloop gelijkaardig.

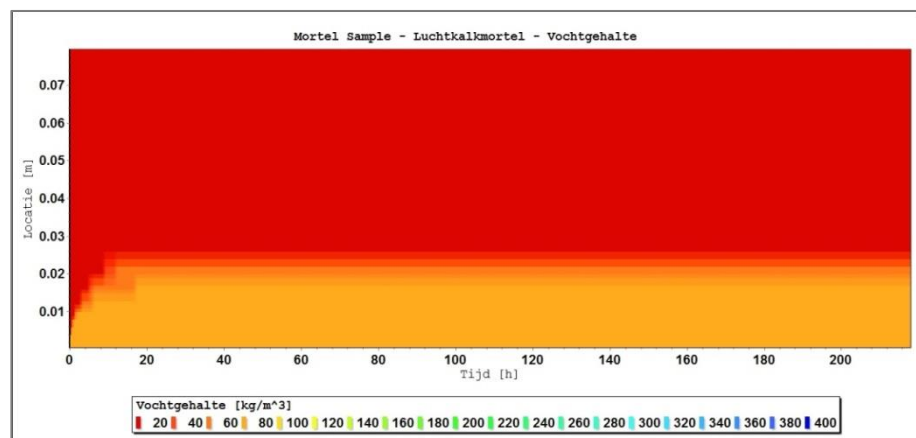
In Bijlage E wordt het temperatuursverloop van de verschillende proefstukken, het temperatuursverloop van de verschillende gecombineerde proefstukken met grensweerstand 1.10^{10} m/s en het temperatuursverloop van het gecombineerd proefstuk met hydraulische kalkmortel, met variërende grensweerstand, weergegeven.

2.3.2| VOCHTGEHALTE PROEFSTUKKEN

Wanneer het vochtgehalte van de verschillende proefstukken gedurende de gesimuleerde absorptieproef wordt uitgezet in de tijd, kan de mate van absorptie onderling en met de experimenteel bekomen resultaten worden vergeleken. Figuren 7.2 en 7.3 geven het vochtgehalte voor historische kalkmortel en luchtkalkmortel weer.



Figuur 7.2| Proefstuk – Historische Kalkmortel – Vochtgehalte



Figuur 7.3| Proefstuk – Luchtkalkmortel – Vochtgehalte

Uit figuur 7.2 blijkt dat historische kalkmortel een vochtgehalte van minimaal 360 kg/m^3 bevat na 20 minuten over de volledige hoogte van het proefstuk. Figuur 7.3 toont aan dat het vochtgehalte in luchtkalkmortel na 20 minuten constant blijft. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de mortel zijn capillair vochtgehalte heeft bereikt. Het aangezogen water dringt door tot een diepte van 2 cm en bereikt een vochtgehalte van 60 kg/m^3 . Dieper in het proefstuk blijft het vochtgehalte constant rond 20 kg/m^3 .

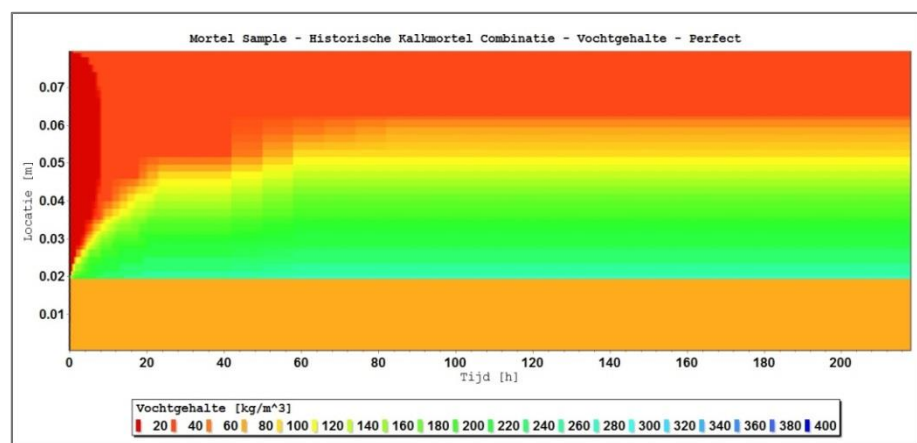
Wanneer ook het vochtgehalte in cementmortel en hydraulische kalkmortel wordt bekeken, blijkt dat het vochtgedrag van cementmortel aanleunt bij het vochtgedrag van luchtkalkmortel, en hydraulische kalkmortel bij dat van historische kalkmortel. Zo bevat hydraulische kalkmortel al na enkele minuten een vochtgehalte van 160 kg/m^3 over het volledige proefstuk. In cementmortel blijkt na enkele uren een vochtgehalte van 70 kg/m^3 aangezogen te zijn over het volledige proefstuk. Dit blijft constant voor de rest van de simulatietijd. Bijlage E bevat het vochtverloop van de verschillende mortels.

Tabel 7.1 geeft een overzicht van de experimenteel bekomen waterabsorptiecoëfficiënten van de verschillende morteltypes. Daaruit kan worden besloten dat hydraulische kalkmortel het vocht aan een veel hogere snelheid aanzuigt dan luchtkalk- en cementmortel. De aanzuiging van water bij luchtkalk- en cementmortel gebeurt gelijkaardig, doch iets sneller bij cementmortel. Het feit dat deze gelijkaardig verlopen kan worden verklaard doordat luchtkalkmortel een bastaardmortel is, en bijgevolg een deel cementmortel bevat.

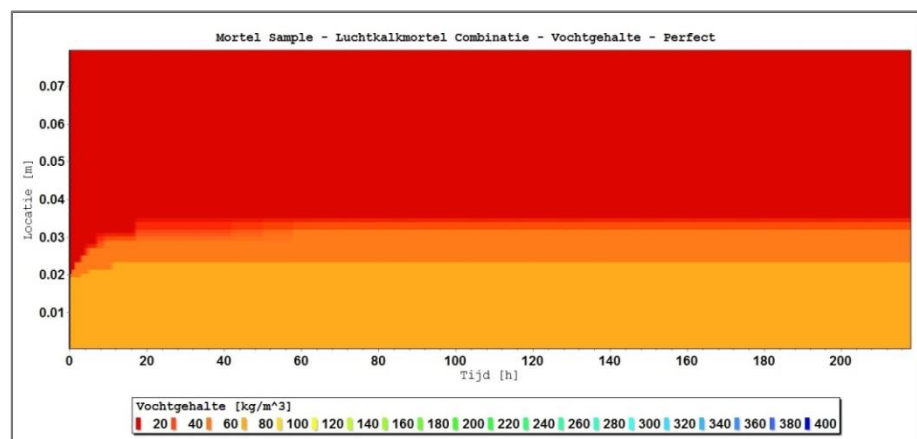
Wanneer deze vergeleken worden met de, in Delphin, bekomen resultaten, blijken de onderlinge verhoudingen gelijkaardig te zijn. Ook hier blijkt namelijk dat hydraulische kalkmortel het vocht veel sneller, en in grotere mate, opzuigt dan luchtkalk- en cementmortel. De resultaten van luchtkalk- en cementmortel liggen hier opnieuw dicht bij elkaar, maar blijken een groter onderling verschil te geven dan in het experimenteel onderzoek. Zoals te verwachten, door de grote porositeit, zuigt de historische kalkmortel het water het snelst en in grootste mate aan.

2.3.3| VERKEERD RESTAUREREN

Door de uitgevoerde simulaties nogmaals te simuleren, nu met een 2 cm cementmortel laag, kan een foutieve restauratie gesimuleerd worden. In de verkregen outputs wordt verwacht het effect te zien van deze, min of meer, waterdichte laag. Figuren 7.4 en 7.5 tonen het resultaat van de restauratie van historische kalkmortel en luchtkalkmortel met cementmortel. Deze kunnen vergeleken worden met figuren 7.2 en 7.3 om de impact van de laag cementmortel te kennen.



Figuur 7.4| Proefstuk – Historische Kalkmortel Comb.- Vochtgehalte - Perfect



Figuur 7.5| Proefstuk – Luchtkalkmortel Comb. – Vochtgehalte - Perfect

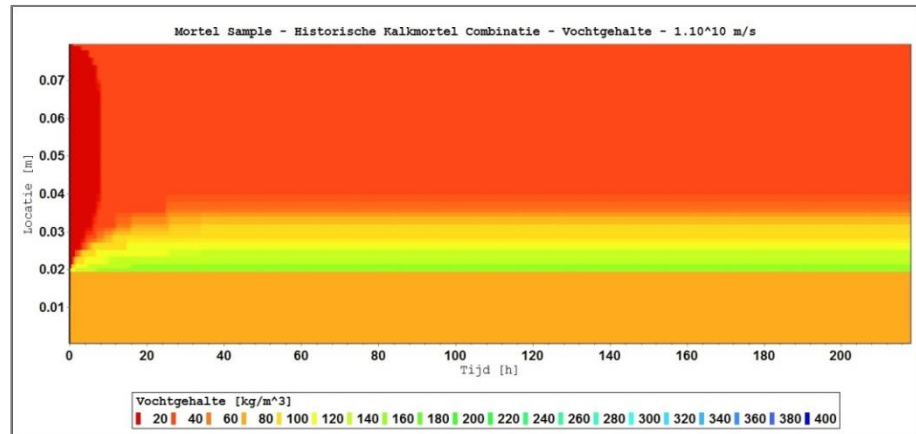
Uit beide figuren is af te leiden dat, zoals voorspeld in de literatuur [10], de cementmortel een waterdichte barrière vormt en dat het vocht zich opstapelt achter de cementmortel. Wanneer deze situatie vergeleken wordt met de pure proefstukken blijkt dat, door de barrière, het totale vochtgehalte in het proefstuk lager is in de gecombineerde situatie. Anderzijds drogen de proefstukken nu ook minder vlot uit.

Bij onderlinge vergelijking blijkt dat de laag cementmortel altijd een gelijke hoeveelheid vocht bevat, ongeacht het type achterliggende mortel. Opnieuw zuigt historische kalkmortel het meeste vocht aan en leunen de resultaten van

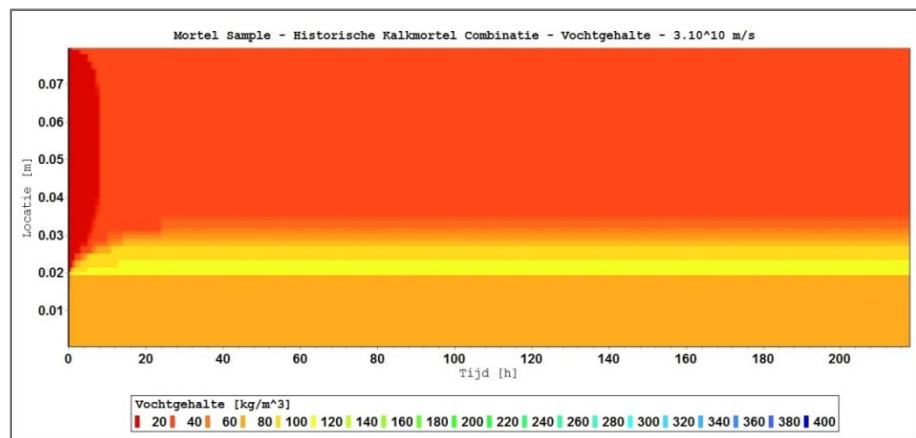
hydraulische kalkmortel daarbij aan. Wanneer ook deze resultaten en onderlinge verhoudingen vergeleken wordt met tabel 7.1 blijkt ook hier dat de simulaties in Delphin5 overeenkomen met de experimenteel bekomen resultaten.

2.3.4| GRENSWEERSTAND COMBINATIES

Net zoals bleek bij het temperatuursverloop, blijkt ook bij het vochtgehalte een groot verschil te zijn tussen de situatie zonder en die met een grensweerstand tussen beide mortels. De grootte van deze grensweerstand maakt echter niet veel verschil. Figuren 7.6 en 7.7 tonen het vochtgehalte van gecombineerde historische kalkmortel in de situatie met een grensweerstand van $3 \cdot 10^{10}$ m/s en een van $1 \cdot 10^{10}$ m/s. Figuur 7.4 toont het geval zonder grensweerstand. Opnieuw blijkt dat ondanks dat de grensweerstand een grote impact heeft, de grootte ervan minder van belang is.



Figuur 7.6| Proefstuk – Historische Kalkmortel Comb.- Vochtgehalte - $1 \cdot 10^{10}$ m/s



Figuur 7.7| Proefstuk – Historische Kalkmortel Comb.- Vochtgehalte - $3 \cdot 10^{10}$ m/s

Bij wijze van extra staving werden de simulaties van de proefstukken vergeleken met deze van de voegen. Zoals verwacht bleek het vochtgedrag gelijkaardig.

In Bijlage E wordt het vochtgehalte van de verschillende proefstukken en het vochtgehalte van de verschillende gecombineerde proefstukken voor de situatie zonder grensweerstand en voor de situaties met een stapsgewijs variërende grensweerstand weergegeven.

2.4| CONCLUSIES

Bij het simuleren van een capillaire absorptieproef bij verschillende types mortel, zowel in de vorm van een proefstuk als in de vorm van een voeg, kunnen enkele conclusies getrokken worden.

Ten eerste blijkt het verloop van de temperatuur en het vochtgehalte gelijkaardig te verlopen voor de verschillende types mortel. Dit blijkt zo te zijn voor zowel de, al dan niet gecombineerde, proefstukken als de voegen.

Wanneer de verschillende types mortel onderling vergeleken worden blijken de gevonden verhoudingen gelijk aan de experimenteel bepaalde verhoudingen. Zo zuigt historische mortel het meeste vocht aan en wordt dit benaderd door hydraulische mortel. Luchtkalk- en cementmortel zijn minder poreus en zuigen minder vocht aan, waarbij luchtkalkmortel het minste vocht aanzuigt van alle types mortel. Het feit dat de resultaten overeenkomen met de experimenteel bepaalde waarden toont aan dat de gebruikte opstelling en materialen accuraat kunnen worden beschouwd om verder gebruikt te worden in verdere simulaties.

Als laatste blijkt dat het foutief restaureren van kalkmortel met een cementmortel, inderdaad, leidt tot een waterdichte barrière waarachter vocht stagneert. Wanneer, in deze gecombineerde proefstukken, de grensweerstand tussen beide mortels onderzocht wordt, blijkt het al dan niet aanwezig zijn van een grensweerstand een grote impact te hebben. De grootte van de grensweerstand is daarentegen minder van belang.

PARAGRAAF 3: COMPOSITIE MODELLEN

1 | OPSTELLING

2 | VOORWAARDEN EN OUTPUTS

3 | SIMULATIES

4 | CONCLUSIES

In deze paragraaf worden de opstelling en resultaten van het tweede deel aan simulaties kort toegelicht. Met de resultaten van dit deel kunnen de interactie en invloed van de grensweerstand tussen baksteen en mortel bestudeerd worden.

3.1| OPSTELLING

In dit tweede deel wordt een combinatie van baksteen met mortel in labo-omstandigheden gesimuleerd. Deze reeks aan simulaties dient ter vergelijking van de grensweerstand tussen steen en mortel. Hierbij wordt de grensweerstand stapsgewijs gesimuleerd voor de verschillende composities in labo-omstandigheden over een periode van tien dagen. Daarbij wordt er gelet om de labo-omstandigheden zo gelijkend mogelijk te houden aan de situatie met reële klimaatdata. Zo wordt aan de linkerzijde een watercontactoppervlak toegepast, maar de overige rand en initiële voorwaarden gelijk gehouden. Uit deze korte simulaties kan de impact van de grootte van de grensweerstand bepaald worden. In het geval van gecombineerde mortels wordt de grensweerstand tussen beide mortels en tussen mortel en baksteen gelijk gehouden. In verder onderzoek kan worden onderzocht wat de impact is van de grensweerstand wanneer deze niet gelijk is tussen beide mortels en tussen mortel en baksteen. Uit de bekomen resultaten kan informatie worden gehaald voor latere simulaties.

Er werden ter controle ook enkele simulaties gedaan waarbij de mortels (in dezelfde opstelling) werden blootgesteld aan klimaatdata uit Essen. Aangezien hieruit dezelfde conclusies konden worden getrokken als deze in labo-omstandigheden, kunnen de, in labo-omstandigheden bekomen, resultaten gebruikt worden in het volgende deel aan simulaties (zie Hoofdstuk 7, paragraaf 4). Tabel 7.3 toont een overzicht van de uitgevoerde simulaties.

Tabel 7.3| Overzicht 84 simulaties compositie modellen.

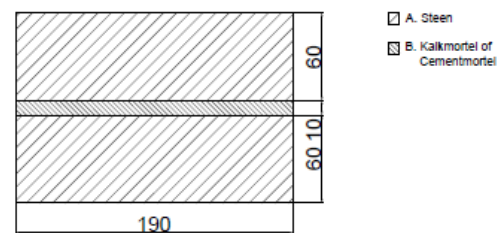
SIMULATIES COMPOSITIE MODELLEN		BAKSTEEN		
MORTEL	Grensweerstand	< A _w	~ A _w	> A _w
Hydraulische Kalkmortel	perfect	x	x	x
	1.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
	3.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
	5.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
Luchtkalkmortel	perfect	x	x	x
	1.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
	3.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
	5.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
Historische Kalkmortel	perfect	x	x	x
	1.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
	3.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
	5.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
Cementmortel	perfect	x	x	x
	1.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
	3.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
	5.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
Combinatie Hydraulische Kalkmortel	perfect	x	x	x
	1.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
	3.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
	5.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
Combinatie Luchtkalkmortel	perfect	x	x	x
	1.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
	3.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
	5.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
Combinatie Historische Kalkmortel	perfect	x	x	x
	1.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
	3.10 ¹⁰ m/s	x	x	x
	5.10 ¹⁰ m/s	x	x	x

De gebruikte bakstenen werden op basis van hun waterabsorptiecoëfficiënt gekozen uit de database van Delphin. Daarbij werd gelet de densiteit, dampdiffusieweerstandsgetal en warmtegeleidingscoëfficiënt zo uniform mogelijk te houden. Tabel 7.4 geeft een samenvatting van de gebruikte stenen weer.

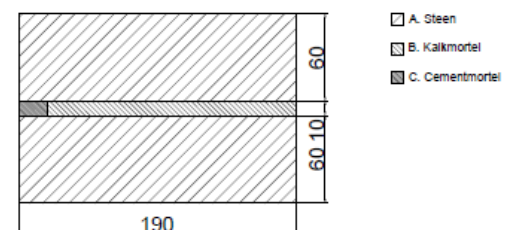
Tabel 7.4| Overzicht gebruikte materiaaldata

MATERIAAL DATA					
LAGERE A_w	Naam	A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	ρ [kg/m ³]	μ [-]	λ [W/mK]
ALGEMEEN	494 Dresden ZF	0.0168	1975.67	41.1	1.012
GELIJKE A_w	Naam	A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	ρ [kg/m ³]	μ [-]	λ [W/mK]
HYDRAULISCHE KALK	547 Tivoli Berlin	0.4890	1469.25	7.2	0.429
LUCHTKALK & CEMENT	510 Lime Sand Brick	0.0516	1813.50	39.8	1.045
HISTORISCHE KALK & COMB.	491 Dresden ZC	0.1718	1904.38	22.9	0.809
COMB. HYDRAULISCHE KALK	685 Lime-Sandbrick	0.3100	1704.60	18.7	1.188
COMB. LUCHTKALK	495 Dresden ZG	0.1374	1715.15	22.2	0.543
HOGERE A_w	Naam	A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	ρ [kg/m ³]	μ [-]	λ [W/mK]
ALGEMEEN	547 Tivoli Berlin	0.4890	1469.25	7.2	0.429
HYDRAULISCHE KALK	547 (aangepast)	0.7	1469.25	7.2	0.429

Figuur 7.8 geeft de gebruikte opstellingen in Delphin weer voor de verschillende gebruikte composities. Er wordt telkens een mortellaag tussen twee gelijke bakstenen gesimuleerd. Dit werd eenmaal gedaan voor een pure mortellaag en eenmaal voor een, met cementmortel, gecombineerde laag. Bij deze simulaties zal de linkerkant tekens grenzen aan een wateroppervlak. De onder- en bovenkant worden als aangrenzende muurconstructie beschouwd. De rechterkant wordt telkens blootgesteld aan de binnenomgeving.



Figuur 7.8-A| Opstelling samenstelling baksteen - mortel [mm]



Figuur 7.8-B| Opstelling samenstelling baksteen – mortel combinatie [mm]

3.2| VOORWAARDEN EN OUTPUTS

3.2.1| OUTPUTS

De temperatuur en het vochtgehalte worden, in functie van de tijd, uitgezet voor de gehele proefstukken. De reeks simulaties worden gedurende een periode van 10 dagen, met een tijdsstap van 1 dag, in labo-omstandigheden gesimuleerd.

3.2.2| VOORWAARDEN

| RANDVOORWAARDEN

Buitenomgeving (wateroppervlak):

10°C watertemperatuur

10 mm pressure head

Binnenomgeving (labo-omstandigheden):

18°C omgevingstemperatuur

55% relatieve vochtigheid

| INITIËLE VOORWAARDEN

De mortelproefstukken worden in evenwicht geacht:

18°C temperatuur

55% relatieve vochtigheid

| CONTACTVOORWAARDEN

De grensweerstand tussen baksteen en mortel wordt stapsgewijs gesimuleerd. In het geval van gecombineerde proefstukken wordt de grensweerstand tussen beide mortels en tussen mortel en baksteen gelijk geacht:

0.10^{10} m/s (perfect contactoppervlak tussen beide materialen)

1.10^{10} m/s

3.10^{10} m/s

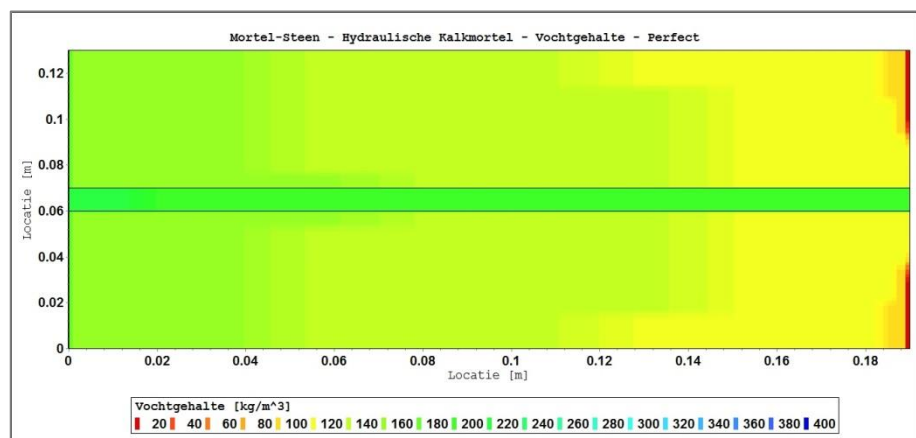
5.10^{10} m/s

3.3| SIMULATIES

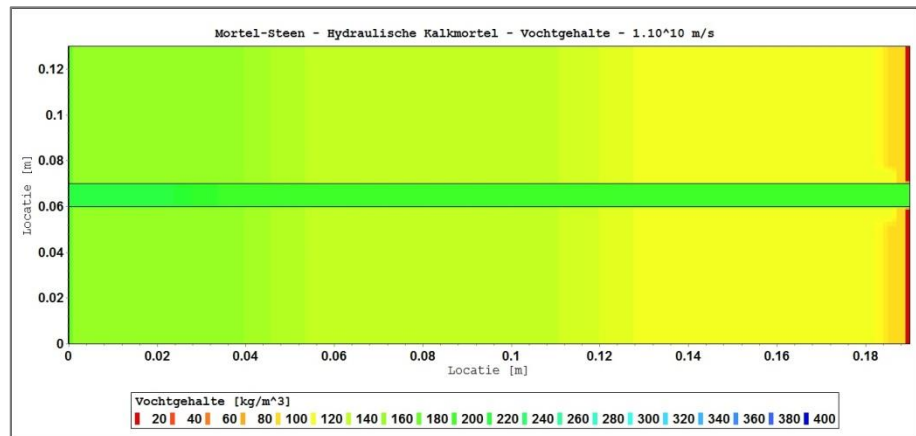
3.3.1| GRENSWEERSTAND BAKSTEEN-MORTELS

De resultaten van deze reeks van 84 simulaties, waarbij de verschillende mortels met verschillende bakstenen werden gecombineerd en waarbij de grensweerstand stapsgewijs gevarieerd werd, zijn weergegeven in Bijlage E. Voor de beknoptheid van deze thesis worden, aangezien gelijke conclusies konden worden afgeleid voor de verschillende mortels, enkel de resultaten voor hydraulische kalkmortel (zowel puur als gecombineerd) volledig weergegeven. Voor de volledigheid, en ter staving, worden ook enkele resultaten van de overige mortels weergegeven.

Figuren 7.9 en 7.10 geven het vochtgehalte van hydraulische kalkmortel in de situatie zonder grensweerstand en in deze met een grensweerstand van 1.10^{10} m/s. Uit de simulaties blijkt dat de grensweerstand opnieuw een invloed op het vochtgedrag heeft, al blijkt deze minder groot dan in de simulaties in deel een. Deze invloed is voornamelijk duidelijk aan het binnenoppervlak.

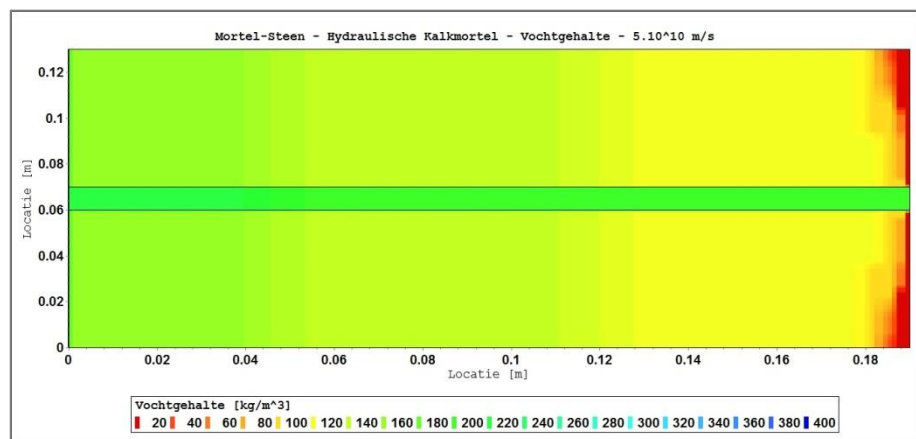


Figuur 7.9| Hydraulische Kalkmortel – Steen - Laag - Vochtgehalte – Perfect



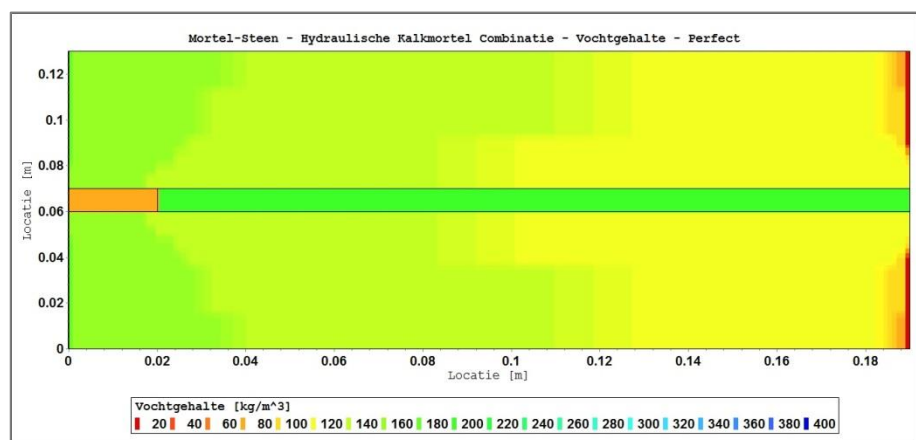
Figuur 7.10| Hydraulische Kalkmortel - Steen – Laag - Vochtgehalte – 1.10^{10} m/s

Opnieuw blijkt de grootte van de grensweerstand niet veel invloed te hebben. Bij een grotere grensweerstand zullen de steen en mortel minder vocht bevatten dan wanneer deze grensweerstand kleiner of onbestaand is. De invloed daarvan is te zien aan het binnenoppervlak. Bij grotere weerstanden strekt deze invloed zich, vanaf het binnenoppervlak, dieper naar het buitenoppervlak uit. Figuren 7.10 en 7.11 staven dit.

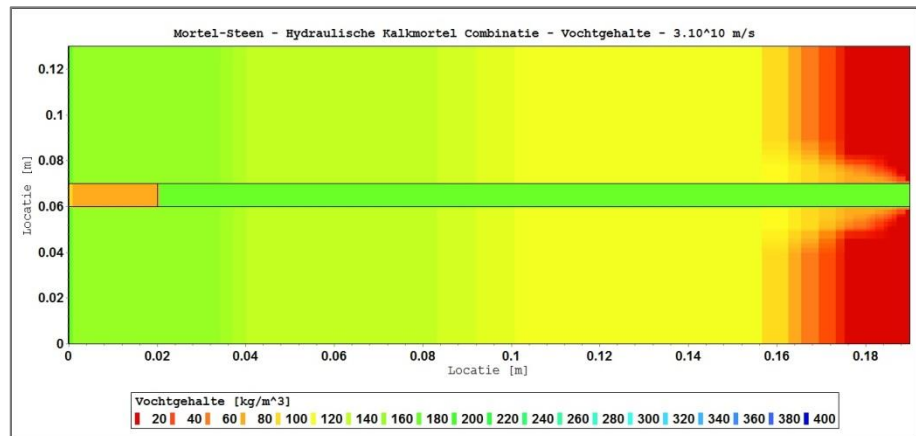


Figuur 7.11| Hydraulische Kalkmortel - Steen – Laag - Vochtgehalte – 5.10^{10} m/s

Ook wanneer de mortels worden gecombineerd met 2 cm cementmortel kunnen dezelfde conclusies afgeleid worden. Figuren 7.12 en 7.13 tonen, ter bewijs, het vochtgehalte van gecombineerde hydraulische kalkmortel in de situatie zonder grensweerstand en in deze met een grensweerstand van 3.10^{10} m/s.



Figuur 7.12| Hydraulische Kalkmortel Comb. - Steen – Laag - Vochtgehalte – perfect



Figuur 7.13| Hydraulische Kalkmortel Comb. - Steen - Laag - Vochtgehalte – $3 \cdot 10^{10}$ m/s

Daarnaast blijkt de grensweerstand ook afhankelijk te zijn van de grootte van de absorptiecoëfficiënt van de bakstenen. Zo blijkt het verschil (tussen een perfecte situatie en een situatie met een grensweerstand) groter bij de combinatie met een baksteen waarvan de waterabsorptiecoëfficiënt lager is, dan bij de combinatie waarbij deze gelijkaardig of hoger is dan dat van de mortel. Om deze reden werden bovenstaande bevindingen gestaafd met resultaten waarin de mortel gecombineerd werd met een baksteen met lagere absorptiecoëfficiënt. In het geval van gelijkaardige of hogere coëfficiënten kunnen dezelfde bevindingen gevonden worden.

In Bijlage E wordt het vochtgehalte van hydraulische kalkmortel, zowel gecombineerd als puur, weergegeven voor de verschillende grensweerstand. Ook wordt het vochtgehalte van de andere types mortel, zowel gecombineerd als puur, weergegeven in combinatie met een baksteen met lagere waterabsorptiecoëfficiënt.

3.4| CONCLUSIES

Uit de simulaties van de verschillende composities kunnen enkele conclusies inzake de grensweerstand tussen beide materialen getrokken worden.

Opnieuw blijkt dat de grensweerstand tussen de verschillende materialen invloed heeft op het vochtgedrag van de materialen. Hierbij blijkt echter dat het verschil tussen de situaties met en zonder grensweerstand (tussen baksteen en mortel) minder groot is dan wanneer de grensweerstand (zoals in het eerste deel gesimuleerd werd) tussen de kalk- en cementmortel wordt beschouwd. Ook blijkt de grootte van de grensweerstand opnieuw minder van belang. De simulaties geven gelijkaardige resultaten voor grensweerstand van $1 \cdot 10^{10}$ m/s, $3 \cdot 10^{10}$ m/s en $5 \cdot 10^{10}$ m/s. Wanneer de resultaten vergeleken worden voor de verschillende grensweerstand blijkt dat de invloed voornamelijk aan de binnenzijde zichtbaar is (te zien aan plaatselijke uitdroging van de mortelvoeg). Bij grotere weerstanden strekt deze zich dieper in het materiaal uit.

Uit de resultaten is al een eerste invloed van de eigenschappen van de bakstenen te zien. Zo blijkt de grensweerstand minder van belang bij poreuzere bakstenen dan bij minder poreuze bakstenen.

PARAGRAAF 4: MASSIEVE MUUR MODELLEN

1 | OPSTELLING

2 | VOORWAARDEN EN OUTPUTS

3 | SIMULATIES

4 | CONCLUSIES

In dit laatste deel aan simulaties wordt een massieve muur gesimuleerd. In deze paragraaf worden de opstelling en resultaten van deze simulaties kort toegelicht. Uit de resultaten zal de invloed van mortelvoegen en eventuele foutieve restauratie bepaald kunnen worden.

4.1| OPSTELLING

In dit derde en laatste deel wordt een realistische opstelling van een massieve muur gesimuleerd. Deze worden onderworpen aan klimaatdata van Essen. Aangezien in het vorig deel werd aangetoond dat de grensweerstand tussen baksteen en mortel weldegelijk van belang is voor het vochtgedrag in de gevel, maar dat de grootte ervan nauwelijks invloed heeft, wordt in dit laatste deel gekozen om te werken met een grensweerstand van $3 \cdot 10^{10}$ m/s. Dit werd gefundeerd door de literatuur [50] en voorgaande resultaten (zie Hoofdstuk 7, paragraaf 3).

Door de mortels telkens te combineren met drie bakstenen (met gelijkaardige, hogere en lagere waterabsorptiecoëfficiënt) kan de relatie tussen bakstenen en mortel bestudeerd worden inzake het vochtgedrag van het metselwerk. Ook kan nogmaals de impact van een restauratie met cementmortel bepaald worden. Ook hier zal de grensweerstand tussen beide mortels op $3 \cdot 10^{10}$ m/s gehouden worden. Verder onderzoek zou kunnen uitwijzen wat de impact zou zijn bij een verschillende grensweerstand tussen beide mortels.

De bekomen resultaten zullen worden vergeleken met homogene baksteenwanden met eenzelfde materialen, afmetingen en randvoorwaarden. Hieruit kan de invloed worden bepaald van de mortelvoegen (zowel lint- als stootvoegen).

Door een pleisterlaag aan te brengen aan de binnenzijde van de opstelling kan op specifieke punten (hier halfweg de bovenste baksteen, ter hoogte van de mortellaag en halfweg de onderste baksteen) de mould index aan de binnenzijde van de wand bepaald worden. Deze factor wordt bepaald door middel van een risicoanalyse via de, aan Delphin inherente, Viitanen Mould Index. Deze wordt op basis van de temperatuur en relatieve vochtigheid op bepaalde punten bepaald. De factor wordt uitgezet in functie van de tijd en heeft een waarde tussen 0 en 6. Hoe hoger de factor, hoe groter de schimmeligroei. Tabel 7.5 [52] geeft de betekenis van de waarde van de mould index weer. Hiermee kan een kwantitatieve waarde, met betrekking tot de kwaliteit van de wand, aan de wand worden toegekend.

Tabel 7.5| Mould growth index in evaluaties en simulaties [52]

Index	Growth rate	
0	No growth	Spores not activated
1	Some growth detected only with microscope	Initial stages of hyphae growth
2	Moderate growth detected with microscope	Coverage more than 10%
3	Some growth detected visually	New spores produced
4	Clear visually detected growth	Coverage more than 10%
5	Plenty of visually detected growth	Coverage more than 50%
6	Very heavy and tight growth	Coverage around 100%

Uit deze simulaties wordt gehoopt nuttige informatie te halen inzake het hygrothermisch gedrag van mortels in metselwerk, het gedrag van baksteen en mortel naar elkaar toe en de impact van restaureren met cementmortel.

Tabel 7.6 toont een overzicht van de uitgevoerde simulaties. De gebruikte stenen en diens eigenschappen werden reeds voorheen samengevat in tabel 7.4.

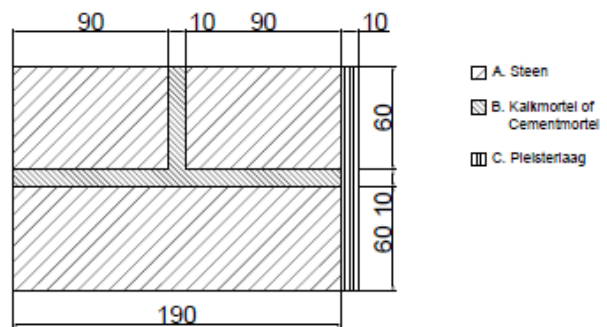
Tabel 7.6| Overzicht 21 simulaties compositie modellen

SIMULATIES MASSIEVE MUUR MODELLEN	BAKSTEEN		
MORTEL	< A_w	~ A_w	> A_w
Hydraulische Kalkmortel	x	x	x
Luchtkalkmortel	x	x	x
Historische Kalkmortel	x	x	x
Cementmortel	x	x	x
COMBINATIEMORTELS	< A_w	~ A_w	> A_w
Hydraulische Kalkmortel	x	x	x
Luchtkalkmortel	x	x	x
Historische Kalkmortel	x	x	x

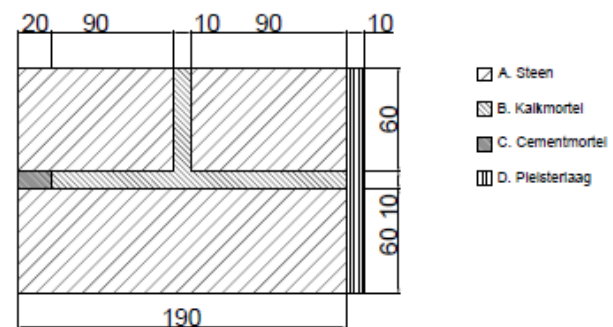
4.1.1| MORTEL

Figuur 7.14 toont aan hoe een benadering van een massieve muur zal gesimuleerd worden in Delphin. Er wordt uitgegaan van een steense muur. Dit wordt uitgevoerd voor de verschillende types mortel, elk gecombineerd met drie verschillende bakstenen. Ook zal restauratie met cementmortel gesimuleerd worden.

Bij deze simulaties zullen klimaatdata van Essen (regen, temperatuur en relatieve vochtigheid) worden toegepast aan de buitenzijde. De binnenzijde zal, gescheiden door een pleisterlaag, grenzen aan labo-omstandigheden. De onder- en bovenzijde worden als aangrenzende muurconstructie beschouwd.



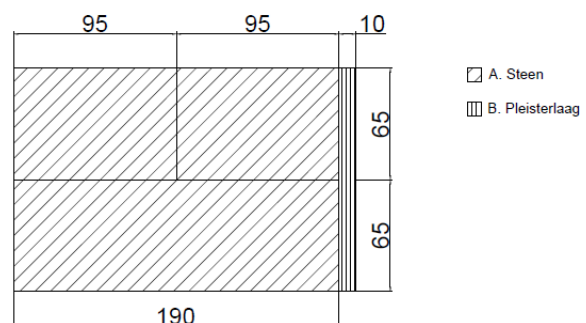
Figuur 7.14-A| Opstelling massieve muur [mm]



Figuur 7.14-B| Opstelling massieve muur [mm]

4.1.2| BAKSTEEN

Figuur 7.15 geeft weer hoe een homogene massieve muur gesimuleerd wordt in Delphin. Onderzoek van Vereecken en Roels [48] gaat dieper in op voorbeelden waarbij metselwerk wordt benaderd door een homogene baksteenwand. Door een homogene referentiewand, met dezelfde afmetingen en onder dezelfde voorwaarden als de later gebruikte opstellingen, te simuleren voor de verschillende gebruikte bakstenen kan een vergelijking gemaakt worden met simulaties waarin de mortelvoeg wel wordt mee gesimuleerd. Zo kan geconcludeerd worden of metselwerk al dan niet kan benaderd worden door een homogene wand.



Figuur 7.15| Opstelling referentiemodel baksteen massieve muur [mm]

4.2| VOORWAARDEN EN OUTPUTS

4.2.1| OUTPUTS

De temperatuur en het vochtgehalte worden in functie van de tijd uitgezet voor de gehele proefstukken. Daarnaast wordt, aan het binnenoppervlak, ter hoogte van de mortel, halfweg de bovenste steen en halfweg de onderste steen, de temperatuur, het vochtgehalte en relatieve vochtigheid uitgezet in functie van de tijd. Met behulp van deze simulaties kan de mould index bepaald worden op die locaties. Hiermee kan een kwantitatieve waarde aan de opstelling worden toegekend. De simulaties worden gedurende een tijdsstap van 1 jaar met een tijdsstap van 1 dag gesimuleerd.

4.2.2| VOORWAARDEN

| RANDVOORWAARDEN

Buitenomgeving:

 klimaatdata Essen

Binnenomgeving (labo-omstandigheden):

 18°C omgevingstemperatuur

 55% relatieve vochtigheid

| INITIËLE VOORWAARDEN

De mortelproefstukken worden in evenwicht geacht:

 18°C temperatuur

 55% relatieve vochtigheid

| CONTACTVOORWAARDEN

De grensweerstand tussen baksteen en mortel wordt constant geacht. In het geval van gecombineerde proefstukken (waarbij een renovatie met 2 cm cementmortel wordt gesimuleerd) wordt de grensweerstand gelijk geacht:

$3 \cdot 10^{10}$ m/s

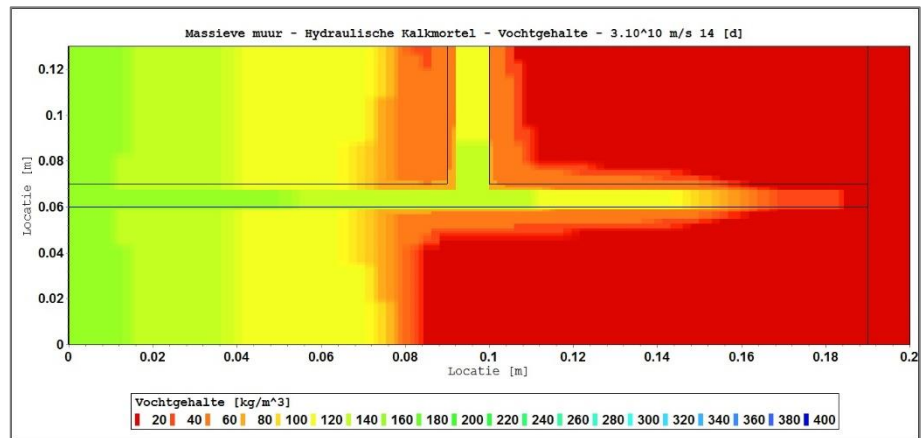
4.3| SIMULATIES

4.3.1| VOCHTGEHALTE MASSIEVE MUUR

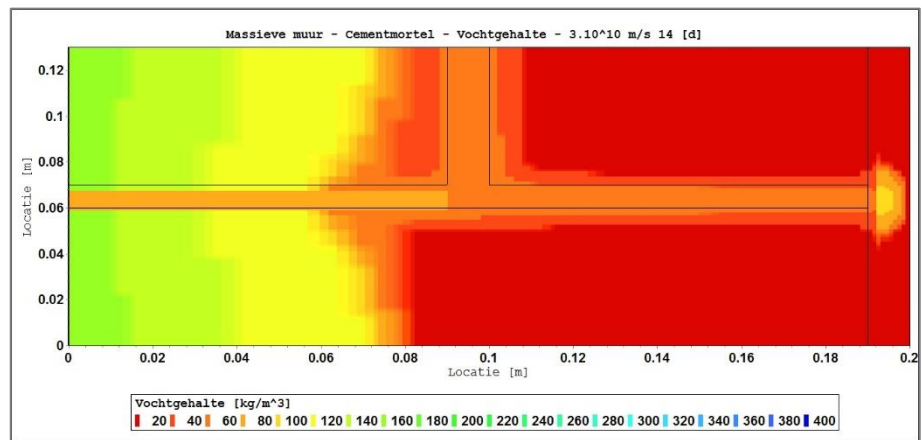
De manier waarop het vochtgehalte in een massieve muur zich gedraagt en wijzigt is afhankelijk van de gekozen mortel en baksteen. In wat volgt zal de reactie op specifieke wijzigingen in het klimaat worden toegelicht voor een massieve muur gemetst met hydraulische kalkmortel. Het vochtgehalte in de opstelling met andere kalk- of cementmortels zal identiek reageren, maar de mate waarin is afhankelijk van de eigenschappen van de mortel.

| INITIËLE AANZUIGING

Aan de hand van de initiële aanzuiging kunnen de verschillende mortels opnieuw onderling vergeleken worden. Opnieuw blijkt dat, na een bepaalde periode, hydraulische kalkmortel het vocht in grotere mate aanzuigt dan luchtkalk- en cementmortel. Ook hier blijkt de mate van aanzuiging van vocht door luchtkalk- en cementmortels gelijkaardig te zijn. De historische kalkmortel blijkt opnieuw het meest water aan te zuigen. (Zie ook Hoofdstuk 7, paragraaf 3). Figuren 7.16 en 7.17 geven het vochtgehalte voor hydraulische kalkmortel en cementmortel in een massieve muur weer.



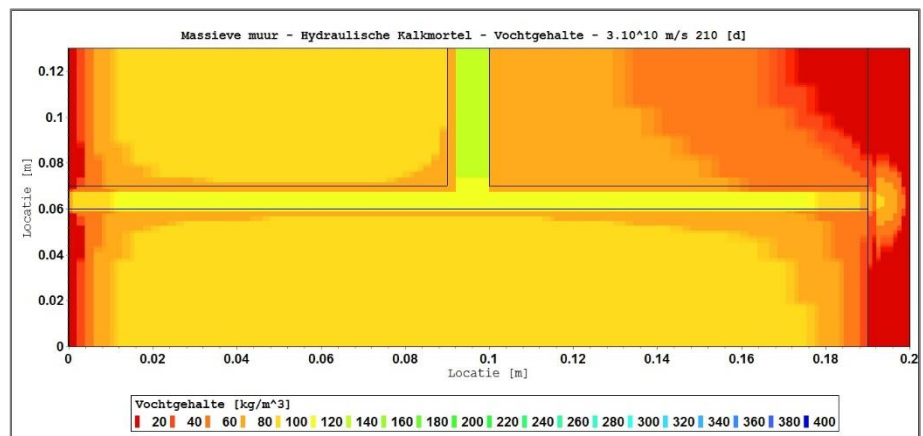
Figuur 7.16| Massieve muur - Hydraulische Kalkmortel - Laag - Vochtgehalte - 14 dagen



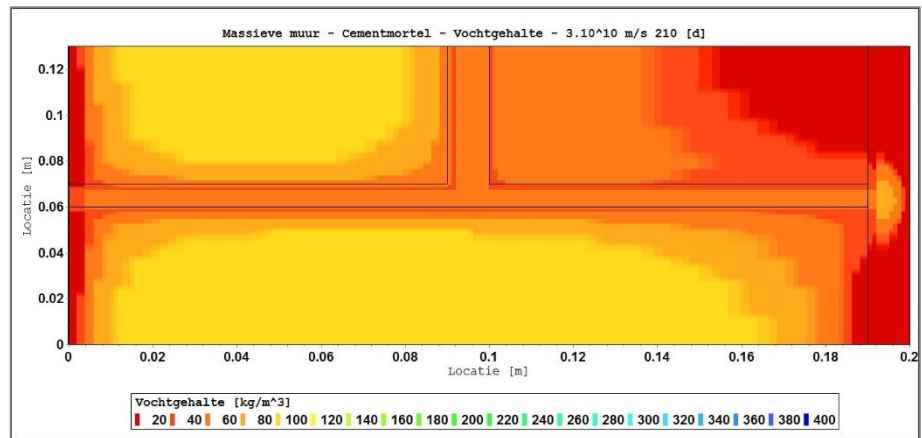
Figuur 7.17| Massieve muur - Cementmortel - Laag - Vochtgehalte - 14 dagen

| DROGE PERIODE

Juli wordt beschouwd als een droge periode in de klimaatdata van Essen (dag 189 - dag 210). Figuren 7.18 en 7.19 geven het vochtgehalte voor hydraulische kalkmortel en cementmortel na deze droge periode. Aan de hand van deze figuren kan de manier van uitdrogen vergeleken worden.



Figuur 7.18| Massieve muur - Hydraulische Kalkmortel - Laag - Vochtgehalte - 210 dagen



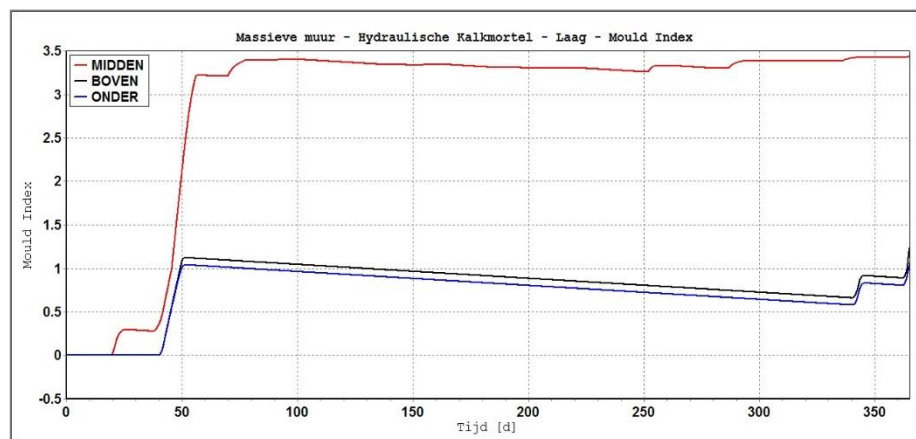
Figuur 7.19| Massieve muur - Cementmortel - Laag - Vochtgehalte - 210 dagen

Net zoals cementmortels vocht in mindere mate aanzuigen drogen zij ook in mindere mate uit dan hydraulische kalkmortel. Als een gevolg is het onderlinge verschil in vochtgehalte in beide mortels kleiner geworden. Wanneer ook het vochtgehalte na 210 dagen voor luchtkalkmortel en historische kalkmortel wordt bekeken, blijkt ook hier het onderlinge verschil verkleind.

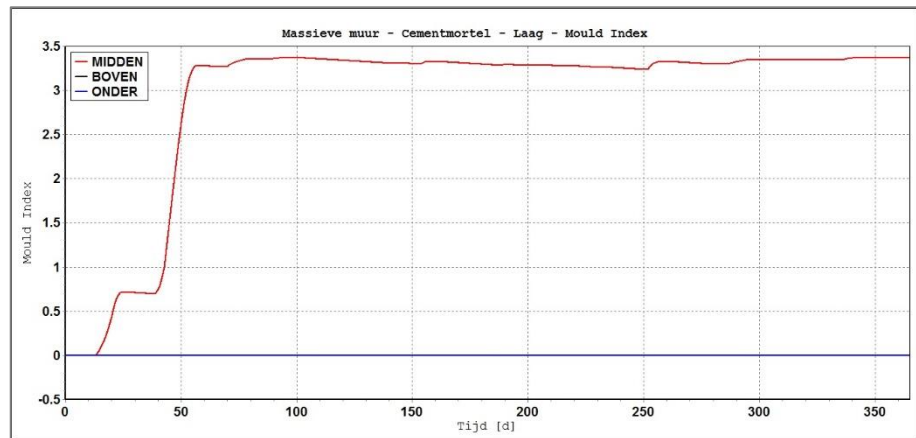
Bovenstaande bevindingen werden telkens gestaafd door middel van de resultaten van de opstellingen met bakstenen met lage absorptiecoëfficiënt. Wanneer deze vergeleken worden met de situaties met bakstenen met gelijke en hoge absorptiecoëfficiënt, blijken de mortels zich op dezelfde manier te gedragen en verhouden. Zo blijkt dat historische kalkmortel het meeste vocht aanzuigt, dat hydraulische kalkmortel zich vergelijkbaar gedraagt doch minder vocht aanzuigt en dat luchtkalk- en cementmortel zich gelijkaardig gedragen, onafhankelijk van het type baksteen. Ter bewijs werden de grafieken van hydraulische kalkmortel (in combinatie met verschillende bakstenen) ingesloten in Bijlage E.

| MOULD INDEX

Bovenstaande bevindingen kunnen ook worden weergegeven door middel van de mould index. Deze geeft de mate van schimmelmengte weer voor een bepaalde periode op specifieke locaties in de constructie. Ook hierin is het vochtgedrag van de mortels leesbaar. In Bijlage E zijn de mould indices voor de verschillende mortels weergegeven. Figuren 7.20 en 7.21 geven de mould index voor hydraulische kalkmortel en cementmortel.



Figuur 7.20| Massieve muur – Hydraulische Kalkmortel - Mould Index



Figuur 7.21| Massieve muur – Cementmortel - Mould Index

Beide mortels blijken een gelijkaardig, en relatief hoog verloop, van de mould index te hebben. Wanneer deze ook vergeleken wordt met de mould index van historische kalkmortel blijkt deze lager te liggen dan de hydraulische kalkmortel. Dit valt te verklaren door de porositeit van de historische kalkmortel. Hoe hoger de porositeit van de mortel, hoe sneller deze vocht zal opnemen, maar ook hoe sneller deze zal uitdrogen. Op die manier zal er zich minder vocht opstapelen voor langere tijd aan het binnenoppervlak.

Wanneer de mould index van luchtkalkmortel en cementmortel (beide weinig poreuze mortels) worden vergeleken blijkt dat luchtkalkmortel een veel lagere mould index heeft dan cementmortel (respectievelijk 0 en 3). Dit valt te verklaren door de porositeit van beide mortels. Luchtkalkmortel heeft een zodanig lage porositeit dat deze weinig tot geen vocht zal opnemen. Op die manier zal het vochtgehalte aan de binnenzijde een maximum van 40 kg/m^3 bedragen. Bij cementmortel kan dit vochtgehalte, ondanks de lage porositeit, oplopen tot 100 kg/m^3 . Door de lage porositeit droogt deze mortel ook minder vlot uit, hetgeen resulteert in een vochttopstapeling aan de binnenzijde die weinig tot niet uitdroogt. Op die manier bereikt de mould index van cementmortel hogere waarden dan deze van luchtkalkmortel. Dit wordt getoond voor cementmortel op figuur 7.21. De mould indices van de overige mortels werden bijgesloten in Bijlage E.

Opnieuw werden de resultaten van de simulaties met bakstenen met lagere absorptiecoëfficiënt gebruikt om bovenstaande fenomenen te verklaren. Wanneer de mould indices van de verschillende mortels vergeleken worden in de gevallen waarbij de bakstenen een gelijke of hogere absorptiecoëfficiënt hebben kunnen eenzelfde bevindingen bekomen worden.

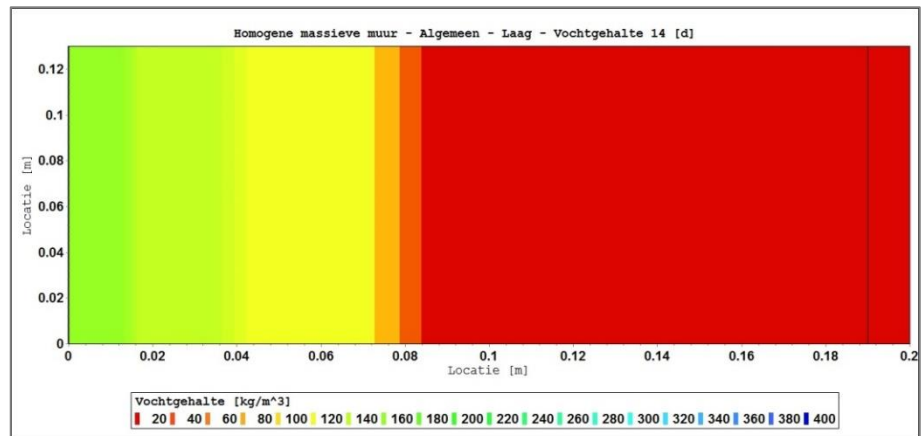
4.3.2| INTERACTIE BAKSTEEN - MORTEL

Bovenstaand besproken gedrag wordt ook beïnvloed door de keuze aan baksteen. Zo zal de mate waarin vocht wordt aangezogen door de mortel ook mee afhankelijk zijn van de waterabsorptiecoëfficiënt van de gebruikte baksteen. In wat volgt zal dieper worden ingegaan op de interactie tussen baksteen en mortel, en zal er ook telkens een vergelijking worden gemaakt met een gehomogeniseerde baksteenwand.

| VERSCHILLENDE ABSORPTIECOËFFICIËNT (BAKSTEEN < MORTEL)

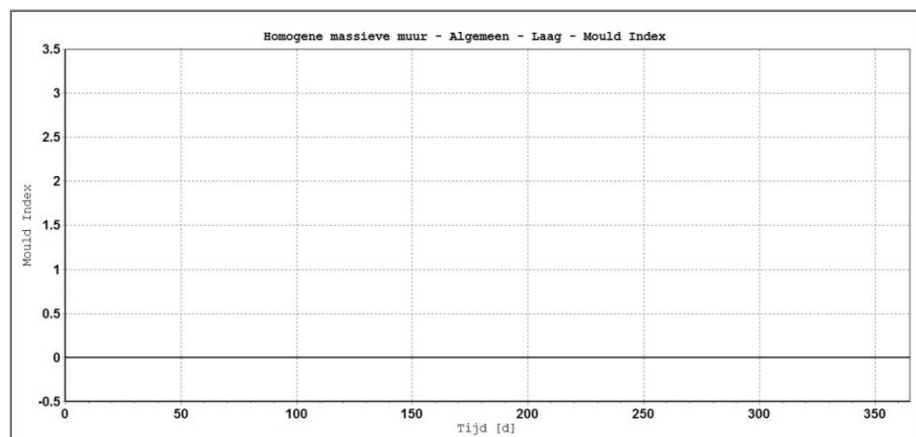
In deze modellen heeft de baksteen een lagere waterabsorptiecoëfficiënt dan de gebruikte mortels. Zo zal de steen waterdichter zijn en minder vlot vocht aanzuigen dan de mortel. Uit een vergelijking van figuren 7.16 en 7.17 met figuur 7.22 kan aangetoond worden dat de mortel de waterabsorptie door de steen bevordert. Ook is zichtbaar dat een hydraulische kalkmortel (of mortel met hoge porositeit in het algemeen) een grotere invloed heeft op het vochtgehalte in de steen dan cementmortel. Luchtkalkmortel blijkt zelfs geen invloed te hebben. Deze invloed is te zien in de aanzuiging van vocht in de steen rond de stoot- en lintvoegen.

Daarnaast blijkt dat, wanneer het vochtgehalte over een volledig jaar wordt bekeken, de vochtopname en uitdroging van de bakstenen minder fluctueren dan deze van de mortels. Dit wordt ook getoond door figuren 7.16 - 7.19.



Figuur 7.22| Homogene Massieve muur - Algemeen laag - Vochtgehalte - 14 dagen

Figuur 7.23 toont de mould index van een gehomogeniseerde wand bestaande uit baksteen met een lage waterabsorptiecoëfficiënt. De mould index is hier 0 hetgeen, volgens tabel 7.5, betekent dat er zich geen schimmeligroei- en -vorming voordoet op de wand. Wanneer deze grafiek vergeleken wordt met de mould index van de modellen waarbij de mortel wel wordt mee gesimuleerd, blijkt de gehomogeniseerde wand een onderschatting van de realiteit. Massieve muren in combinatie met kalk- en cementmortels, met uitzondering van luchtkalk, leiden namelijk tot zichtbare schimmeligroei ter hoogte van de mortelvoeg. In het geval van hydraulische kalkmortel, doet er zich daarnaast ook lichte schimmeligroei voor ter hoogte van de bakstenen.

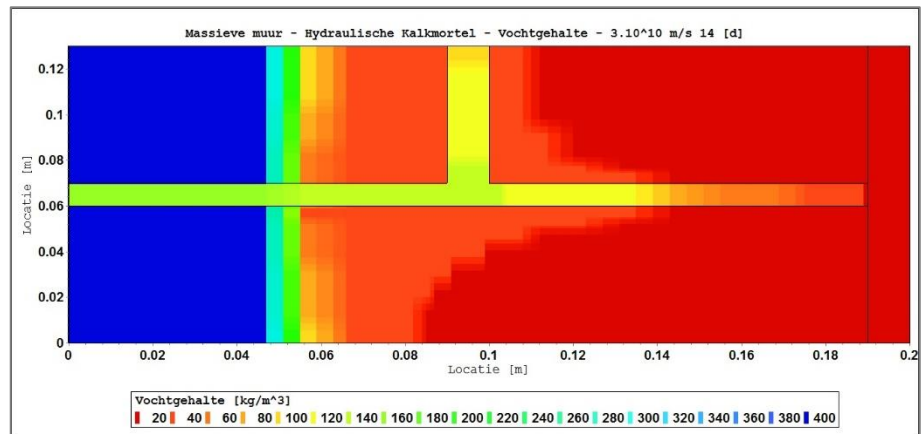


Figuur 7.23| Homogene Massieve muur - Algemeen laag – Mould Index

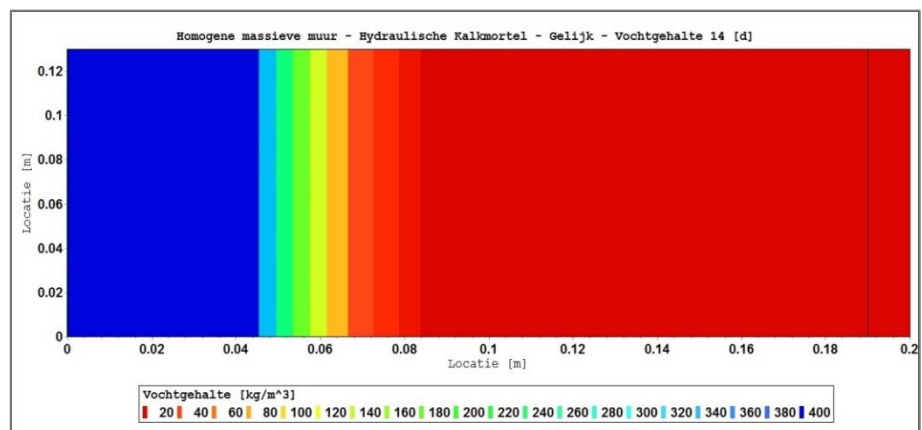
| GELIJKE ABSORPTIECOËFFICIËNT

Figuur 7.24 geeft het vochtgehalte weer voor hydraulische kalkmortel in combinatie met een steen met gelijkaardige waterabsorptiecoëfficiënt. Hierop is te zien dat er weinig tot geen vocht aanzuiging plaatsvindt in de bakstenen aan de stoot- en lintvoegen. Ook blijkt de baksteen weinig invloed uit te oefenen op de mortelvoegen. Wanneer figuur 7.24 wordt vergeleken met figuren 7.16 en 7.28 blijkt dat het vochtgehalte, in respectievelijk de mortelvoegen en baksteen, gelijklopend is. Uit deze vergelijking is ook af te leiden dat het vochtgehalte in de bakstenen, ten gevolge van de verhoogde porositeit, hoger is dan in figuur 7.25. Wanneer het vochtgehalte van de mortelvoeg in beschouwing wordt genomen blijkt deze minder te bedragen ter hoogte van het binnenoppervlak. Hier wordt vocht uit de mortel aangezogen door de poreuzere steen. Deze invloed is echter minimaal. Wanneer eenzelfde vergelijking wordt gemaakt bij de andere morteltypes blijkt ook hier bovenstaand verschijnsel plaats te vinden. In het geval van luchtkalk- en cementmortel is de invloed van de poreuzere bakstenen duidelijker zichtbaar dan in het geval van hydraulische kalkmortel.

Bij historische kalkmortel blijkt de invloed van de klimaatdata een grotere invloed te hebben dan bij de andere kalkmortels. Zo zal het model met een poreuzere baksteen (in combinatie met historische kalkmortel), na een droge periode, minder vocht bevatten dan deze met een mindere poreuze baksteen (ten gevolge van de snelle uitdroging door de hoge porositeit) en zal, na een regenbui, het model met een poreuzere baksteen vochtiger zijn dan het model met een minder poreuze baksteen (ten gevolge van de snelle waterabsorptie door de hoge porositeit).

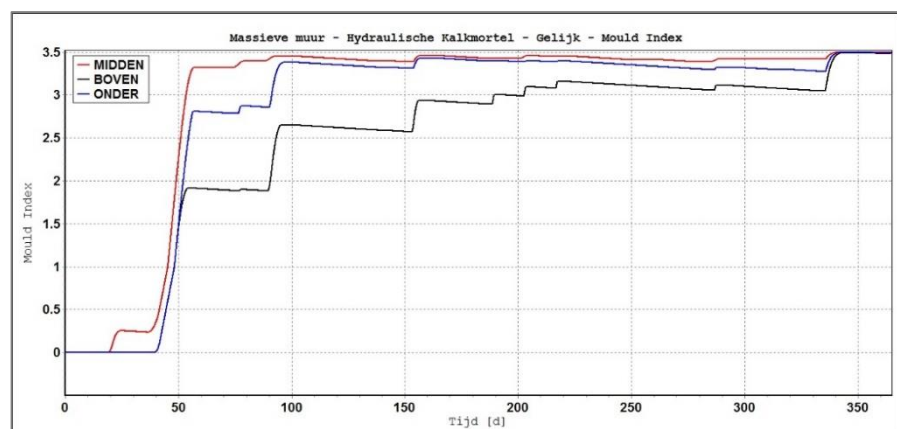


Figuur 7.24| Massieve muur - Hydraulische Kalkmortel - Gelijk - Vochtgehalte - 14 dagen

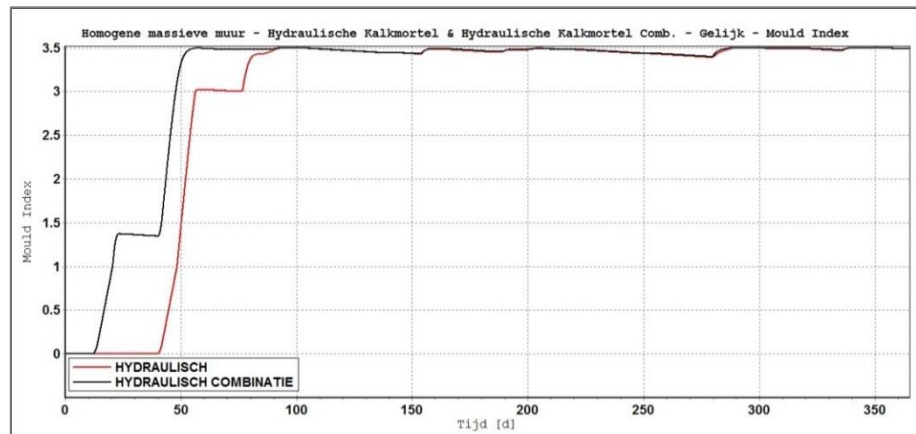


Figuur 7.25| Homogene Massieve muur - Gelijk Hy - Vochtgehalte - 14 dagen

Bij de gehomogeniseerde wanden bestaande uit bakstenen met gelijkaardige waterabsorptiecoëfficiënten blijkt zich na 50 dagen een schimmelgroei van 3.5 voor te doen voor hydraulische en historische kalkmortels. Bij luchtkalk- en cementmortel bedraagt de mould index 0, en doet er zich geen schimmelgroei voor. Een waarde van 3.5 is vrij hoog en betekent, volgens tabel 7.5, dat er zich zichtbare schimmelgroei en -vorming voordoet. Wanneer deze grafieken vergeleken wordt met de mould index van de modellen waarbij de mortel wel wordt mee gesimuleerd blijkt de gehomogeniseerde wand voor de kalkmortels een benadering van de realiteit. Vooral in de eerste dagen blijkt de gehomogeniseerde wand een kleine overschatting van de realiteit. In het geval van cementmortel vormt de homogene metselwand ter hoogte van de mortelvoeg een grote onderschatting van de realiteit. Figuur 7.26 en 7.27 geven de mould index voor hydraulische kalkmortel in de gevallen van een massieve wand en een gehomogeniseerde wand weer. Bij zowel hydraulische als historische kalkmortel doet er zich, naast zichtbare schimmelgroei op de bakstenen, zichtbare schimmelgroei voor ter hoogte van de mortelvoeg.



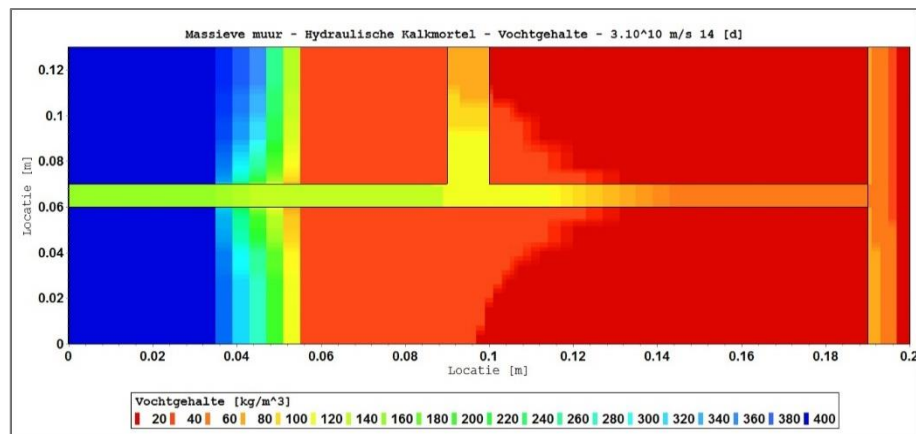
Figuur 7.26| Massieve muur – Hydraulische Kalkmortel - Mould Index



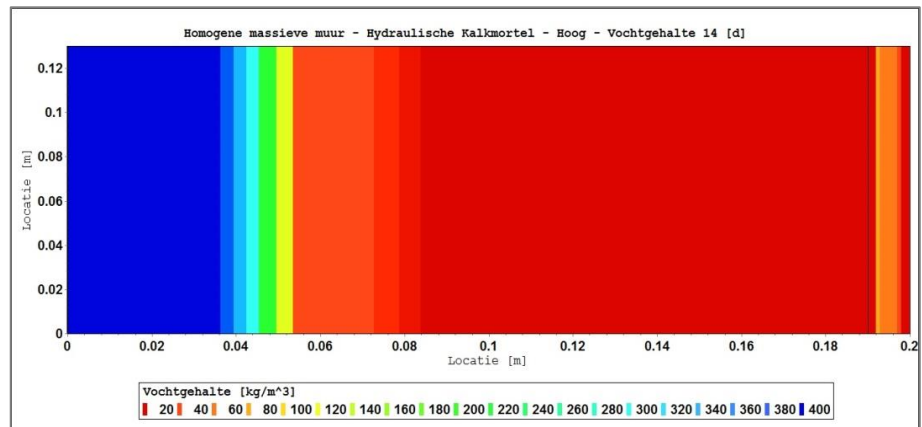
Figuur 7.27| Homogene Massieve muur – Gelijk Hy & HyC – Mould Index

| VERSCHILLENDE ABSORPTIECOËFFICIËNT (BAKSTEEN > MORTEL)

In deze modellen vormt de mortel een waterdichter materiaal dan de bakstenen. Hierdoor zullen de voegen fungeren als 'waterdichte barrière'. Figuur 7.28 toont het vochtgehalte in het geval met hydraulische kalkmortel. Hierop is te zien dat, als een gevolg van de minder poreuze voegen, de bovenste baksteen aan de binnenzijde minder vocht bevat dan de overige stenen. Wanneer vergeleken wordt met een homogene wand (figuur 7.29) blijkt de onderste steen zich gelijkaardig te gedragen en de bovenste stenen, ten gevolge van de stootvoeg, verschillend. Ook blijkt, uit een vergelijking met figuur 7.24, dat de bakstenen vocht uit de mortelvoeg onttrekken. Op die manier bevatten de stenen (voor luchtkalkmortel, historische kalkmortel en cementmortel) in deze situaties meer vocht dan in de vorige. In het geval van hydraulische kalkmortel is het vochtgehalte van de bakstenen in beide situaties gelijkaardig. Dit kan worden verklaard worden door de gebruikte baksteen. In het geval van hydraulische kalkmortel werd gebruikt gemaakt van een aangepaste baksteen (doordat de database in Delphin niet de gepaste bakstenen bevat). Door gebruik te maken van deze aangepaste baksteen liggen de eigenschappen dichter bij elkaar en zijn de resultaten bijgevolg gelijkaardig.



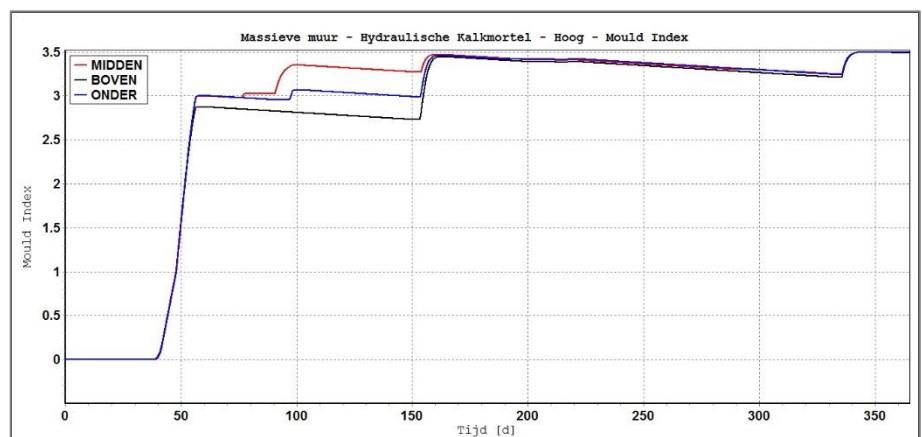
Figuur 7.28| Massieve muur - Hydraulische Kalkmortel - Hoog - Vochtgehalte - 14 dagen



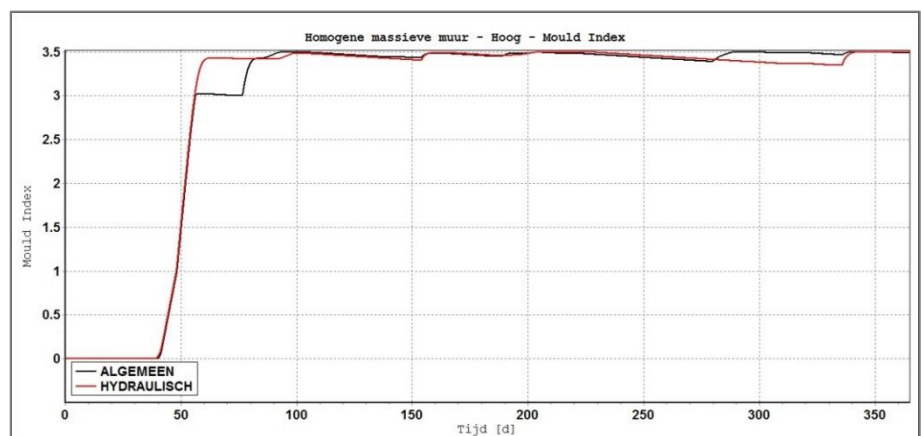
Figuur 7.29| Homogene Massieve muur - Hoog Hy - Vochtgehalte - 14 dagen

Daarnaast blijkt uit de resultaten opnieuw dat de verschillende types zich op eenzelfde manier verhouden ten opzichte van elkaar. Dit blijkt onafhankelijk te zijn van de gekozen baksteen.

In het geval van een homogene wand bedraagt de mould index 3.5 (figuur 7.31), hetgeen al vrij hoog is. Volgens tabel 7.5, betekent dit dat er zich zichtbare schimmelgroei en -vorming voordoet op de wand. Wanneer deze grafiek vergeleken wordt met de mould index van de modellen waarbij de mortel wel wordt mee gesimuleerd (figuur 7.30 voor hydraulische kalkmortel en Bijlage E voor overige mortels), blijkt de gehomogeniseerde wand een lichte overschatting van de realiteit. De combinatie van bakstenen met hoge absorptiecoëfficiënt leidt met elk type mortel tot schimmelgroei (schommeling tussen 3 en 3.5) op zowel bakstenen als ter hoogte van de mortelvoeg. De verwachte schimmelgroei ligt echter wat lager dan de voorspelde schimmelgroei bij een homogene massieve wand.



Figuur 7.30| Massieve muur – Hydraulische Kalkmortel - Mould Index



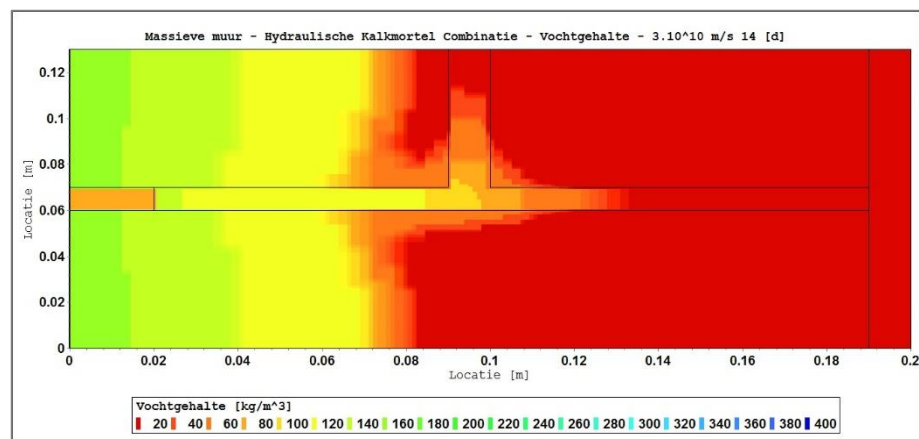
Figuur 7.31| Homogene Massieve muur - Algemeen hoog – Mould Index

Gelijkaardige vergelijkingen kunnen gemaakt worden voor de overige mortels. De resultaten van die simulaties zijn bijgevoegd in Bijlage E.

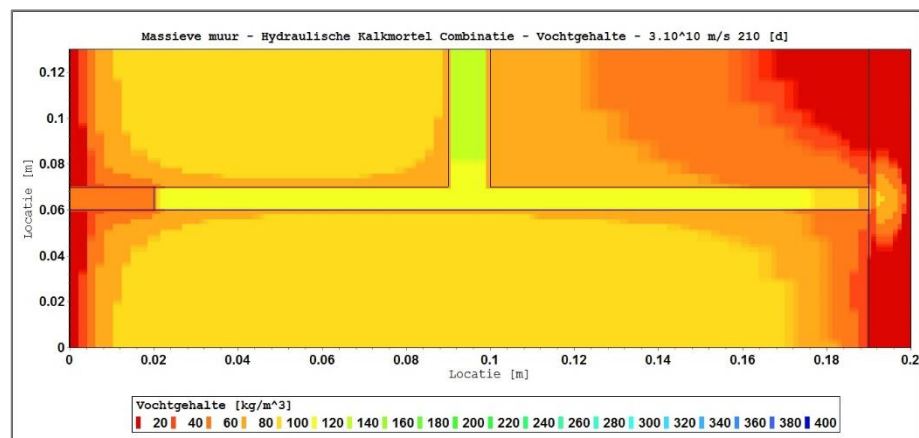
4.3.3| VERKEERD RESTAUREREN

Opnieuw kan het vochtgehalte doorheen het metselwerk bekeken worden na restauratie met cementmortel. Doordat deze niet compatibel is met de kalkmortels wordt een vochttopstapeling achter de cementmortel verwacht en anderzijds, ten gevolge van de waterdichte barrière, minder waterabsorptie en dus een droger metselwerk.

Figuur 7.32 geeft het vochtgehalte voor gerestaureerde hydraulische kalkmortel in combinatie met een steen met lagere absorptiecoëfficiënt, na 14 dagen en na 210 dagen. Wanneer deze vergeleken wordt met figuren 7.16 en 7.18 blijken deze niet veel te verschillen. Eenzelfde resultaten kunnen worden gevonden voor de andere types mortel. Eventuele verschillen kunnen voorkomen in de eerste weken, maar op lange termijn gedragen de gerestaureerde muren zich gelijk aan de massieve muren (deze resultaten werden in Bijlage E bijgesloten).



Figuur 7.32-A| Massieve muur - Hydraulische Kalkmortel Comb. - Laag - Vochtgehalte - 14 dagen

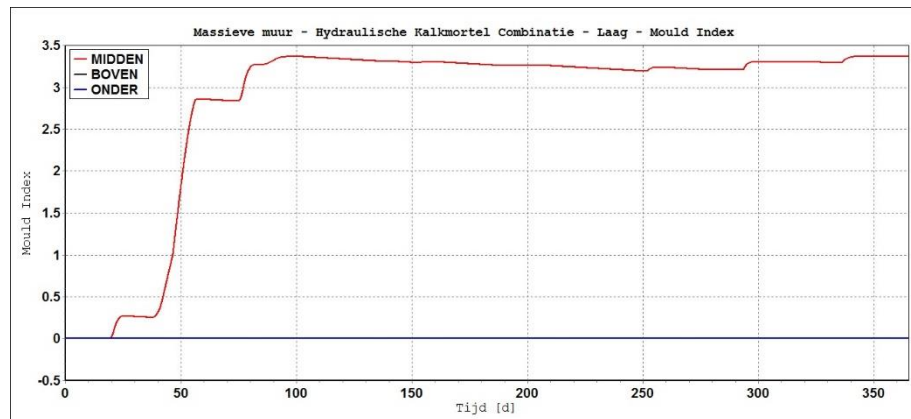


Figuur 7.32-B| Massieve muur - Hydraulische Kalkmortel Comb. - Laag - Vochtgehalte - 210 dagen

Uit beide figuren is af te leiden dat, zoals voorspeld in de literatuur [10], de cementmortel een waterdichte barrière vormt. Dit blijkt echter minimaal te zijn. De mortel zal, in deze gevallen, vocht aantrekken via de bakstenen. Een mogelijke verklaring hiervoor is de gebruikte grensweerstand tussen de cement- en kalkmortel.

Daarnaast blijkt opnieuw dat de laag cementmortel altijd een gelijkaardige hoeveelheid vocht zal bevatten, ongeacht de achterliggende mortel (zie Hoofdstuk 7, paragraaf 2). Ditzelfde geldt voor de bakstenen.

De mould index blijkt voor elk type mortel lager te zijn dan deze van de overeenkomstige gehomogeniseerde wand. Figuur 7.33 geeft de mould index van gerestaureerde hydraulische kalkmortel weer. In het geval van gerestaureerde historische kalkmortel en luchtkalkmortel blijkt de mould index nul te zijn.



Figuur 7.33| Massieve muur – Hydraulische Kalkmortel - Mould Index

Verder onderzoek dient de integriteit van het gebruikte model en de bekomen resultaten aan te tonen.

4.4| CONCLUSIES

Uit de simulaties kan eerst en vooral worden afgeleid dat de verschillende mortels zich, op basis van vochtgedrag, opnieuw op eenzelfde manier (zoals gevonden in het experimenteel deel en bij voorgaande simulaties) verhouden ten opzichte van elkaar. Deze verhouding blijkt onafhankelijk te zijn van de gebruikte baksteen.

Daarnaast kan, inzake de interactie tussen baksteen en mortel, worden afgeleid dat de eigenschappen van de gebruikte baksteen weldegelijk een invloed hebben op het vochtgedrag van de mortel, en omgekeerd. Algemeen blijkt dat het meest poreuze materiaal vocht aan zuigt uit het minst poreuze materiaal. Wanneer mortels worden gecombineerd met stenen met een lagere absorptiecoëfficiënt zal de mortel vocht aanzuigen uit de stenen. Op die manier wordt de waterabsorptie van de steen bevorderd. Wanneer mortels worden gecombineerd met stenen met een hogere absorptiecoëfficiënt zullen de stenen vocht aanzuigen uit de mortelvoegen. Dit zal leiden tot drogere mortelvoegen.

Uit een vergelijkende studie met gehomogeniseerde wanden kon worden aangetoond dat zowel de lint- als stootvoegen een invloed hebben op het vochtgehalte in de stenen. Voegen die, in vergelijking met de gebruikte bakstenen, poreus zijn, zullen vocht aanzuigen tot diep in het metselwerk. Op die manier ontstaat vochttopstapeling aan het binnenoppervlak. Dit verschil in vochtgedrag met een homogene metselwand blijkt ook uit de mould index. Wanneer de mould index van beide situaties wordt vergeleken blijkt het homogeen metselwerk in dit geval een onderschatting te zijn van de werkelijkheid.

Wanneer de voegen, in vergelijking met de gebruikte bakstenen, echter, weinig poreus zijn, zullen deze voegen een waterdichte barrière vormen in het metselwerk. Als een gevolg zullen de binnenste bakstenen minder vocht bevatten dan in het geval van een homogene metselwand. Dit verschil uit zich ook in het verloop van de mould index. Zowel de homogene wand als de massieve wanden (waarbij mortel wordt gecombineerd met bakstenen die een hogere absorptiecoëfficiënt hebben) leiden tot schimmelvorming op de binnenwand. Toch blijft de gehomogeniseerde wand een lichte overschatting van de realiteit.

Wanneer de mortel en bakstenen een even grote waterabsorptiecoëfficiënt hebben beïnvloeden beide materialen elkaar nauwelijks. Aan het binnenoppervlak is een kleine vochtaanzuiging door de bakstenen uit de mortelvoeg merkbaar. In deze gevallen blijkt een homogene baksteenwand de beste benadering te geven. Ook de mould index verloopt gelijkaardig in beide situaties (al blijkt bij cementmortel de schimmelgroei ter hoogte van de mortelvoeg te worden onderschat).

Daarnaast kan worden opgemerkt dat de meest poreuze mortels (historische en hydraulische kalkmortel) vaker zullen leiden tot schimmelgroei dan minder poreuze mortels (luchtkalk- en cementmortel). Dit valt te verklaren door de snelheid van absorberen en drogen van de verschillende mortels. Wanneer, in metselwerk, gebruik wordt gemaakt van een mortel die vlot vocht absorbeert en terug uitdroogt zal, enerzijds, meer vocht aanwezig zijn in het metselwerk (na een regenbui) en, anderzijds, zich minder vocht opstapelen aan het binnenoppervlak (door vlotte uitdroging). Wanneer gebruik wordt gemaakt van een minder poreuze mortel (die bijgevolg minder vlot absorbeert maar ook minder vlot uitdroogt) zal (na een regenbui) minder vocht aanwezig zijn in het metselwerk dan bij poreuzere mortels. Anderzijds zal de mortel (na vochtabsorptie) niet vlot uitdrogen. Poreuze en weinig poreuze mortels die grote hoeveelheden vocht aanzuigen (en niet vlot genoeg kunnen uitdrogen) geven bijgevolg meer aanleiding tot schimmelgroei.

Uit het onderzoek naar gerestaureerd metselwerk blijkt cementmortel niet zoveel invloed te hebben als voorspeld [10]. Dit zou kunnen liggen aan de gebruikte materiaaleigenschappen (van zowel baksteen als mortel). Een andere mogelijke verklaring hiervoor is de gebruikte grensweerstand tussen de kalk- en restauratiemortel. In dit onderzoek werd dit gelijk geacht aan de grensweerstand tussen de kalkmortel en bakstenen. In verder onderzoek zou de grensweerstand tussen beide mortels kunnen worden onderzocht. Hieruit zouden realistischere modellen kunnen worden ontwikkeld voor het simuleren van een gerestaureerd historisch metselwerk.

|HOOFDSTUK 8: CONCLUSIES

Het doel van deze scriptie was om een beter inzicht te krijgen in de invloed van historische mortels op het hygrothermisch gedrag van metselwerk. Uit de literatuur bleek dat, ten gevolge van de complexiteit van het hygrothermisch gedrag van poreuze materialen, in vorig onderzoek veelal werd uitgegaan van vereenvoudigde opstellingen, waarbij een muur aanzien werd als louter baksteen. Studies tonen eveneens aan dat deze homogenisering een foutieve schatting is van het hygrothermisch gedrag van massief metselwerk.

Door middel van onderzoek (zowel experimenteel als aan de hand van het HAM-simulatieprogramma Delphin) werd in deze thesis de invloed van mortelvoegen op het hygrothermisch gedrag van metselwerk nagegaan, meer in het bijzonder van historisch metselwerk.

In een eerste, experimenteel, luik werd door middel van capillaire absorptieproeven onderzoek verricht naar het hygrothermisch gedrag van verschillende types mortel. De keuze van de mortels werd bepaald op basis van hun samenstelling en courant gebruik in de bouwpraktijk. Mortels worden, op basis van bindmiddel, ingedeeld in vijf mortelsoorten: luchtkalkmortel, hydraulische- en puzzolaankalkmortel, bastaardmortel en cementmortel. Op basis van navraag bij een werfleider en bij de bedrijven zelf werd gekozen voor een luchtkalkmortel, een cementmortel en een hydraulische kalkmortel. De luchtkalkmortel en cementmortel werden verkregen bij het Belgische bedrijf Cantillana NV, en de hydraulische kalkmortel werd aangekocht bij Remmers BVBA.

De mortels werden vervaardigd, uitgehard en gedroogd volgens de overeenkomstige norm. De uitgeharde en droge proefstukken werden, teneinde een ruwer contactoppervlak te bekomen, in twee gebroken. De proefstukken werden met de gebroken zijde, op steunen, in een waterbad geplaatst. Om diffusief uitdrogen tegen te gaan werd de proef uitgevoerd in een gesloten omgeving. Op vaste tijdstippen (initieel na 10, 30, 60 en 90 minuten en daarna om de 24 uur) werd de gewichtstoename van het proefstuk gemeten. Door deze gewichtstoename per contactoppervlak uit te zetten in functie van de tijd werd voor elk type mortel de overeenkomstige absorptiecurve bekomen. Hieruit konden volgende hygrothermische eigenschappen van de mortel bepaald worden: het capillair vochtgehalte en de waterabsorptiecoëfficiënt.

Het capillair vochtgehalte wordt gedefinieerd als het vochtgehalte waarop de primaire absorptiefase overgaat in de secundaire absorptiefase. Het capillair vochtgehalte geeft een eerste idee van de porositeit en hygrothermisch gedrag van de verschillende mortels.

De waterabsorptiecoëfficiënt werd zowel grafisch (aan de hand van de absorptiecurve) als overeenkomstig met de norm NBN EN 1015-18 bepaald. Uit de resultaten van beide methodes bleek dat de absorptiecoëfficiënt van hydraulische kalkmortel beduidend hoger is dan deze van luchtkalk- en cementmortel. Luchtkalk- en cementmortel bleken een gelijkaardige absorptiecoëfficiënt te hebben hetgeen verklaard kan worden door het aandeel cement als bindmiddel in de gebruikte luchtkalkmortel. Aangezien de porositeit van het materiaal een maat is voor de hoeveelheid holtes en poriën in het materiaal, kon ook, op basis van de bekomen resultaten, een schatting worden gemaakt van de porositeit van de gebruikte mortels.

De afwijkingen op de resultaten van beide methodes kunnen verklaard worden doordat de analytische methode (via de norm) gebruik maakt van de resultaten na 10 en 90 minuten en de grafische methode rekening houdt met alle resultaten voordat het capillair vochtgehalte bereikt wordt. Aangezien het capillair vochtgehalte niet voor alle proefstukken in de eerste 90 minuten werd bereikt, zijn de resultaten voor beide methodes bijgevolg soms afwijkend.

In een tweede luik werden de experimenteel bekomen resultaten geïmplementeerd in het numeriek HAM-simulatieprogramma Delphin. Op die manier werd een zo realistisch mogelijk model opgesteld en kon, door het simuleren van verschillende combinaties baksteen en mortel, de invloed en interactie van en tussen poreuze materialen bepaald worden. Door middel van deze simulaties werd de invloed van mortelvoegen (zowel lint- als stootvoegen) in het metselwerk aangetoond.

In een eerste deel simulaties werd een capillaire absorptieproef in labo-omstandigheden nagebootst. Hiervoor werd gebruik gemaakt van een cementmortel, historische kalkmortel, hydraulische kalkmortel en luchtkalkmortel. Uit deze eerste reeks simulaties werden dezelfde verhoudingen van het hygrothermisch gedrag van de verschillende mortels afgeleid als uit het experimenteel onderzoek. Opnieuw bleek dat hydraulische kalkmortel meer en vlotter vocht aanzoog dan luchtkalk- en cementmortel. Historische kalkmortel bleek opnieuw het meest poreuze verdrag te vertonen. Aangezien gelijkaardige resultaten werden bekomen als uit het experimenteel onderzoek, werden de gebruikte eigenschappen accuraat beschouwd. Doorheen de verschillende simulaties werd, ongeacht de gebruikte randcondities of grenswaarden, telkens eenzelfde verhouding voor de mortels gevonden.

In een tweede deel werden twee gemetste bakstenen gesimuleerd. De vier verschillende mortels werden telkens gecombineerd met drie bakstenen (met gelijkaardige, lagere en hogere waterabsorptiecoëfficiënt). Hierbij werd de grensweerstand voor elke combinatie van mortel en baksteen gevarieerd tussen 0 m/s, $1 \cdot 10^{10}$ m/s, $3 \cdot 10^{10}$ m/s en $5 \cdot 10^{10}$ m/s. Uit de resultaten bleek dat niet de grootte van de grensweerstand maar wel de aanwezigheid van de grensweerstand van belang is voor het vochtgedrag van het metselwerk. Aangezien er uit de resultaten weinig tot geen verschil werd gevonden tussen een grensweerstand van $3 \cdot 10^{10}$ m/s en van $5 \cdot 10^{10}$ m/s, en uit de literatuur bleek dat de

werkelijke grensweerstand tussen $2.5 \cdot 10^{10}$ m/s en $5 \cdot 10^{10}$ m/s gelegen is, werd een grensweerstand van $3 \cdot 10^{10}$ m/s als het meest representatief beschouwd voor het vervolg van de simulaties.

In het derde en laatste deel simulaties werd een realistische massieve muur gesimuleerd. Hierbij werden de verschillende mortels opnieuw met drie verschillende bakstenen gecombineerd. De verschillende combinaties werden telkens onderworpen aan klimaatdata van Essen gedurende een tijdspanne van een jaar. Uit de resultaten blijkt dat zowel de mortelvoegen, de gebruikte bakstenen als de verhoudingen van de porositeiten van beide materialen (meer bepaald de waterabsorptiecoëfficiënt) van belang zijn voor het hygrothermisch gedrag van het metselwerk. Algemeen kan worden gesteld dat het meest poreuze materiaal vocht zal aanzuigen uit het minst poreuze materiaal. Wanneer de waterabsorptiecoëfficiënten van beide materialen (bakstenen en mortel) gelijkaardig zijn zullen de materialen een minimale invloed op elkaar uitoefenen. Ook de stootvoegen spelen hierbij een belangrijke invloed. Zij bepalen het vochtgehalte van de door mortel ingesloten stenen en bijgevolg de potentiële vochttopstapeling en schimmelvorming ter hoogte van deze stenen.

Wanneer de bekomen resultaten vergeleken werden met de overeenkomstige homogene metselwanden kon worden besloten dat een homogenisering enkel een goede benadering vormt van massief metselwerk in het geval dat de absorptiecoëfficiënten van de bakstenen en mortel gelijkaardig zijn. Wanneer de bakstenen poreuzer zijn dan de mortelvoegen vormen de mortelvoegen een waterdichte barrière. De binnenste ingesloten bakstenen blijken minder vocht te bevatten dan in het geval van een homogene metselwand. Bijgevolg blijkt dat een gehomogeniseerde metselwand een lichte overschatting vormt van het vochtgehalte. Ook de mould index van de overeenkomstige homogene metselwand vormt een kleine overschatting. In het geval van minder poreuze bakstenen (en poreuzere mortelvoegen) zullen de mortelvoegen vocht aanzuigen tot diep in het metselwerk. Op die manier ontstaat vochttopstapeling aan het binnenoppervlak. In deze gevallen vormt een gehomogeniseerde wand een onderschatting van het vochtgehalte en de mould index van het metselwerk.

Met betrekking tot het restaureren van historisch metselwerk kan worden besloten dat de materiaaleigenschappen juist bepaald dienen te worden. Slecht op die manier kunnen gepaste restauratiekeuzes gemaakt worden. Zo blijkt, uit de gevonden mould indices, dat het voordelig is om met een compatibele mortel te werken die poreuzer is dan de aanwezige bakstenen.

Bij wijze van bijkomend onderzoek werden bovenstaande proeven en simulaties hernomen om de invloed van foutief restaureren van kalkmortels met cementmortel te bestuderen. Uit de literatuur bleek dat een restauratiemortel compatibel hoort te zijn met de verweerde historische kalkmortel. Op die manier heeft een restauratie met cementmortel nadelige gevolgen voor het vochtgedrag in het metselwerk.

Als uitbreiding van het experimenteel luik werden, naast de pure proefstukken, ook telkens combinaties gemaakt van kalkmortel met 2 cm cementmortel. Deze gecombineerde proefstukken werden mee onderworpen aan de capillaire absorptieproef. Hieruit bleek dat de cementmortel wel degelijk een invloed heeft op het vochtgedrag van de kalkmortel. Bij de proefstukken op basis van hydraulische kalkmortel vormde het cement een waterdichte barrière. Bij de proefstukken op basis van luchtkalk bleek het cement een kleine invloed te hebben.

Deze bevindingen kwamen overeen met de resultaten bekomen via het eerste deel simulaties. Ook hier bleek de cementlaag een waterdichte barrière te vormen waarachter vocht opstapelde. Daarnaast bleek opnieuw dat de aanwezigheid - en niet de grootte - van een grensweerstand van belang is voor het hygrothermisch gedrag van de mortels.

Als uitbreiding van het derde deel simulaties (waarbij een met cementmortel gerestaureerde massieve muur werd gesimuleerd) bleek de cementmortel echter niet zoveel invloed te hebben als voorspeld in de literatuur. Ook bleken deze modellen een lagere mould index te hebben dan de niet gerestaureerde massieve muren, hetgeen zou betekenen dat er zich weinig tot geen vocht over lange tijd zou opstapelen in het metselwerk.

Een mogelijke verklaring hiervoor is de gebruikte grensweerstand tussen de kalk- en cementmortel. In verder onderzoek zou de werkelijke grensweerstand tussen beide mortels kunnen onderzocht worden. Met behulp van deze waarden zou een juister model kunnen worden opgesteld voor het simuleren van foutief gerestaureerd metselwerk.

|HOOFDSTUK 9: BIBLIOGRAFIE

- [1] Vlaamse Overheid, „Inventaris Bouwkundig Erfgoed,” Vlaamse Overheid, 2016. [Online]. Available: <https://inventaris.onroenderfgoed.be/dibe>. [Geopend December 2016].
- [2] Vlaamse Overheid, „Onroerend Erfgoed,” Vlaamse Overheid, 2016. [Online]. Available: <https://www.onroenderfgoed.be/nl>. [Geopend December 2016].
- [3] N. Vernimme, *Energiezuinig leven in woningen met erfgoedwaarde*, Brussel: Flanders Heritage, 2013.
- [4] A. Janssens, *Syllabus Bouwfysische aspecten van gebouwen*, Gent: Universiteit Gent, 2014-2015.
- [5] N. Van Den Bossche, *Watertightness of building components: principles, testing and design guidelines*, Gent: Universiteit Gent, 2013.
- [6] Monumentenwacht Vlaanderen, „Onderhoud en herstel van voegen in historisch metselwerk,” Drukkerij Leën, Hasselt, 2013.
- [7] R. Hendrickx, K. Van Balen en D. Van Gemert, „De verwerkbaarheid van metselmortel,” K.U.Leuven, Leuven, 2010.
- [8] C. Groot en J. Gunneweg, „Bouwstenen voor de Richtlijn Bestekteksten,” TU Delft, Delft, 2012.
- [9] WTCB, „TVN 208: Opvoegen van Metselwerk,” Claes Printing NV, Brussel, 1998.
- [10] C. Groot, „Steen- en mortelkeuze voor zwaar regenbelast massief metselwerk,” in *Aanpak Vochtproblematiek Massief Metselwerk*, Delft, TUDelft, 2007, pp. 59-69.
- [11] W. Jansen, „Mortels,” Steenderen, 2012.
- [12] C. Ladang, C. Xhonneux, J. Horemans, P. Magera en C. Ployaert, „Betonbestanddelen,” in *Betontechnologie*, Brussel, Belgische Betongroepering, 2013, pp. 23-147.
- [13] I. Dirx en Y. Grégoire, „Specificaties voor Pleistermortels,” *WTCB-dossiers*, vol. 2, nr. 9, pp. 1-4, 2010.
- [14] K. Van Balen, B. van Bommel, R. van Hees, M. van Hunen, J. van Rhijn en M. van Rooden, *Kalkboek. Het gebruik van kalk als bindmiddel voor metsel- en voegmortels in verleden en heden*, Zeist: Rijksdienst voor de Monumentenzorg, 2003.
- [15] Knauf, „Stukadoren,” Knauf, 15 Februarie 2014. [Online]. Available: <http://www.knauf.be/nl/node/8306>. [Geopend 19 Mei 2017].
- [16] L. Taerwe, *Syllabus Betontechnologie*, Gent: Universiteit Gent, 2014-2015.
- [17] K. Van Balen, *Witkalken en kalkverf Gebruik en restauratie*, Leuven: K.U.Leuven, 2001.
- [18] „The Lime Cycle,” University of Dundee, 3 September 2007. [Online]. Available: <http://www.trp.dundee.ac.uk/research/glossary/limecyclepic.html>. [Geopend Februarie 2017].
- [19] „Betonlexicon: Hydratatie,” Aeneas Media, 04 October 2016. [Online]. Available: <http://betonlexicon.nl/H/Hydratatie/>. [Geopend Februarie 2017].
- [20] H. England, *Practical Building Conservation - Mortars, Renders & Plasters*, English Heritage, 2012.

- [21] J. Beeckman, Syllabus Duurzame energie en rationeel energiegebruik, Gent: Universiteit Gent, 2017.
- [22] Het Beste Reparatiehandboek, Brussel: Reader's Digest, 1974.
- [23] H. D. Young en R. A. Freedman, Sears and Zemanzky's University Physics with modern physics, San Francisco: Pearson Education, 2012.
- [24] B. Braeckman, N. De Cock en K. Drugmand, Thermisch & Hygrisch gedrag van bouwconstructies, Antwerpen: Benoît Braeckman, 1987.
- [25] „NBN EN ISO 6946: Bouwelementen en bouwdelen - Warmteweerstand en warmtedoorgangscoefficiënt - Berekeningsmethode,” NBN, 2008.
- [26] WTCB, „TVN 153: Vochthuishouding in gebouwen. Schadeoorzaken. Koude bruggen. Binnenklimaat.,” Drukkerij PUVREZ n.v., Brussel, 1984.
- [27] „NBN EN ISO 12572: Warmte- en vochteigenschappen van bouwmaterialen en -producten. Bepaling van de waterdampdoorlatendheidseigenschappen.,” NBN, Brussel, 2001.
- [28] WTCB, „Speciale uitgave: houtbouw,” *Contact*, vol. 1, pp. 12-15, 2013.
- [29] J. F. Straube, Moisture Control and Enclosure Wall Systems, Waterloo: University of Waterloo, 1998.
- [30] B. H. Vos, Vochttransport in en droging van bouwmaterialen, nr. 21, Brussel: Stichting Bouwresearch, 1969.
- [31] C. Colla, F. Grüner, B. Dieruff en e.a., „D5.1 - part 1: Report on test methods and former test results,” MPA Universität Stuttgart, Stuttgart, 2010.
- [32] N. Karagiannis, M. Karoglou, A. Bakolas en A. Moropoulou, „Building Materials Capillary Rise Coefficient: Concepts, Determination and Parameters Involved,” *Springers: New Approaches to Building Pathology and Durability*, pp. 27-44, 2016.
- [33] „NBN EN 1015-11: Proeven voor metselmortel - Deel 11: Bepalen van de buigsterkte en druksterkte van verharde mortel,” NBN, 1999.
- [34] „NBN EN 1015-18: Proeven voor metselmortel - Deel 18: Bepaling van de capillaire waterabsorptie van verharde pleistermortels,” NBN, 2003.
- [35] S. Roels en J. Carmeliet, „Analysis of moisture flow in porous materials using microfocus X-ray radiography,” *Elsevier: International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 4762-4772, 2006.
- [36] L. Schueremans, Ö. Cizer, E. Janssens, G. Serré en K. Van Balen, „Characterization of repair mortars for the assessment of their compatibility in restoration projects: Research and practice,” *Elsevier: Construction and Building Materials*, pp. 4338-4350, 2011.
- [37] B. H. Vos, Meetmethoden ter bepaling van warmte-weerstand, vochtgehalte en vochtverdeling, nr.12, Brussel: Stichting Bouwresearch, 1968.
- [38] „RILEM 25 PEM: Water absorption tube test,” RILEM ASTM, Parijs, 2006.
- [39] M. Bomberg, „Heat, air and moisture interactions,” *Elsevier: Frontiers of Architectural Research*, vol. 2, pp. 116-119, 2013.

- [40] J. Langmans, „De mogelijkheden en de limitaties van hygrothermische (HAM) simulaties van gebouwcomponenten,” BAUPHI bvba, Gent, 2016.
- [41] H. M. Künzle, „Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components,” Fraunhofer IRB, Stuttgart, 1995.
- [42] H. Hens, Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts, Final Report, Volume 1, Leuven: International Energy Agency, 1996.
- [43] P. Blom en S. B. Holos, „Moisture content in insulated basement walls,” in *8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries*, Copenhagen, 2008.
- [44] T. Ter Bekke, „Vochttransport in monumentaal metselwerk,” T.U.Delft, Delft, 2001.
- [45] A. Nicolai, J. Grunewald en J. S. Zhang, „Recent improvements in HAM simulation tools: Delphin 5 / CHAMPS-BES,” Syracuse University, Syracuse, 2007.
- [46] A. Nicolai en J. Grunewald, Delphin 5 Version 5.2 User Manual and Program Reference, Dresden: Delphin, 2006.
- [47] H. Lund, „The Design Reference Year Users Manual,” Technical University of Denmark, Lyngby, 1995.
- [48] E. Vereecken en S. Roels, „Hygric performance of a massive masonry wall: How do the mortar joints influence the moisture flux?,” *Elsevier: Construction and Building Materials*, vol. 41, pp. 697-707, 2012.
- [49] H. Janssen, H. Derluyn en J. Carmeliet, „Moisture transfer through mortar joints: interface resistances or hygric property changes?,” Technical University of Denmark, Lyngby, 2007.
- [50] H. Derluyn, H. Janssen en J. Carmeliet, „Influence of the nature of interfaces on the capillary transport in layered materials,” *Elsevier: Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 3685-3693, 2010.
- [51] C. Hall en W. D. Hoff, Water transport in brick, stone and concrete, London: Spon Press, 2002.
- [52] H. Viitanen, „Factors affecting mould growth on kiln dried wood,” VTT Building and Transport Finland, Finland.

|HOOFDSTUK 10: BIJLAGES

BIJLAGE A | VOORBEREIDING EXPERIMENT

BIJLAGE B | CAPILLAIRE ABSORPTIEPROEF

BIJLAGE C | MATERIAALDATA

BIJLAGE D | MASSABALANSEN DELPHIN

BIJLAGE E | RESULTATEN DELPHIN

|BIJLAGE A: VOORBEREIDING EXPERIMENT

A.1| MORTELKEUZE

| HYDRAULISCHE KALKMORTEL

Kalk. Pure hydraulische natuurlijke witte kalk.
Artikelnummer 223912
Remmers BVBA

| LUCHTKALKMORTEL/ BASTAARDMORTEL

Tradimur: metselmortel met luchtkalk
Cantillana NV

| HISTORISCHE KALKMORTEL

Historic Kalkmortel (met pitten)
Artikelnummer 0543
Remmers BVBA
(besteld in februari, nog niet geleverd eind mei)

| CEMENTMORTEL

Mur 8/2: metselmortel M5
Cantillana NV

A.2| PROEFSTUKKEN

| NBN EN 1015-11

"De proefstukken zijn prisma's 160 mm x 40 mm x 40 mm. Men maakt drie proefstukken voor drie drukproeven en breekt de prisma's in twee helften om zes halve prisma's te maken." [33]

| METHODE

Met een paneelzaag werd betonplex 18 mm op maat gezaagd. Per bekistingsbakje (van drie malen) werd gebruik gemaakt van vier tussenschotjes (168 mm x 40 mm x 18 mm) en twee zijbalkjes (252 mm x 40 mm x 18 mm) met telkens vier groeven (18 mm breed en 4 mm diep). De uitvoering volgens tand en groef systeem leidt tot een vlottere ontlasting. Figuur 10.1 toont het resultaat.



Figuur 10.1| Bekistingsbakje

Bij het maken van combinaties werden uitsparingen gemaakt door het verticaal gebruik van tussenschotjes. Op die manier werd 2 cm voorzien om nadien op te vullen met cementmortel. Figuur 10.2 verduidelijkt dit principe.



Figuur 10.2| Opstelling combinatieproefstukken

Opdat de spatkrachten, bij het vullen, de plankjes niet uit elkaar zouden drijven, werden de bekistingsbakjes met tape vastgezet. In het geval van mortels op basis van waterbindende bindmiddelen en luchtkalkcementmortels met een maximaal luchtkalkaandeel van 50% van de volledige bindmiddelmassa (in dit geval cementmortel en hydraulische mortel) werden de bekistingsbakjes vastgezet op een betonplex plaat. De bakjes werden gevuld in twee lagen en telkens 25 maal verdicht met een stamper. De mortel werd bovenaan afgestreken. De bakjes werden, opdat een goede uitharding zou worden bekomen, twee dagen opgeslagen in een verzegelde polyethyleen zak. [34]

In het geval van luchtkalkmortels en luchtkalkcementmortels met een maximaal cementaandeel van 50% van de volledige bindmiddelmassa (in dit geval luchtkalkmortel) werden de bekistingsbakjes niet rechtstreeks op de betonplex plaat vastgezet. Op de plaat werden twee lagen droge witte katoengas en zes lagen filterpapier geplaatst. Daarbovenop werden de bekistingsbakjes vastgezet en, na het vullen van de mallen, bedekt met opnieuw zes lagen filterpapier en twee lagen katoengas. Het geheel werd afgedekt met een tweede betonplex plaat en belast met een massa van 5 kg. Na drie uur werd de belasting weggehaald en werden de bakjes vijf dagen opgeslagen in een verzegelde polyethyleen zak. [34]

Na het uitharden konden de proefstukken ontkist worden en gedroogd worden in een droogoven aan $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Een voorbeeld van de ontkiste proefstukken wordt getoond door figuur 10.3.



Figuur 10.3| Ontkiste proefstukken cementmortel

Na het drogen werden de proefstukken in twee gebroken opdat een ruwer contactoppervlak zou worden bereikt. Deze breuk werd bereikt door beide uiteindes van de proefstukken op houten latjes te laten rusten en in het midden te belasten met een stevige slag van een hamer.

| SAMENSTELLINGSTABEL

Tabel 10.1 vat de opgemeten samenstelling, na droging, van de verschillende proefstukken samen.

Tabel 10.1| Samenstellingstabel

HYDRAULISCHE KALK					
Remmers KALK ®		RIJNZAND 0/2 [g]	WATER [g]	TOTAAL [g]	
Hy1	58.2	32.5	116.4	207.2	
Hy1B	48.4	27.0	96.7	172.1	
Hy2	55.4	31.0	110.8	197.2	
Hy2B	52.2	29.2	104.4	185.8	
Hy3	54.2	30.3	108.5	193.0	
Hy3B	52.8	29.5	105.7	188.0	
LUCHTKALK					
Cantillana Tradimur ®		RIJNZAND 0/2 [g]	WATER [g]	TOTAAL [g]	
Lu1	221.1	0	31.0	252.1	
Lu1B	210.4	0	29.5	239.9	
Lu2	248.7	0	34.9	283.6	
Lu2B	180.1	0	25.3	205.4	
Lu3	229.1	0	32.1	261.2	
Lu3B	202.1	0	28.4	230.5	
CEMENT					
Cantillana Mur 8/2 ®		RIJNZAND 0/2 [g]	WATER [g]	TOTAAL [g]	
C1	176.8	0	23.0	199.8	
C1B	175.9	0	22.9	198.8	
C2	172.6	0	22.4	195.0	
C2B	181.0	0	23.5	204.5	
C3	178.2	0	23.1	201.3	
C3B	172.3	0	22.4	194.7	
COMBINATIES					
Met hydraulische kalk		CEMENT	RIJNZAND 0/2 [g]	WATER [g]	TOTAAL [g]
HyC1	48.8	51.3	97.6	34.0	231.7
HyC1B	46.7	48.3	93.5	32.4	220.9
HyC2	43.8	54.7	87.7	31.6	217.8
HyC2B	50.1	49.4	100.2	34.4	234.1
HyC3	48.2	47.6	96.5	33.2	225.5
HyC3B	43.2	52.7	86.4	30.9	213.2
Met luchtkalk		CEMENT	RIJNZAND 0/2 [g]	WATER [g]	TOTAAL [g]
LuC1	173.8	60.5	0	32.3	266.6
LuC1B	170.0	59.2	0	31.5	260.7
LuC2	167.8	58.4	0	31.1	257.3
LuC2B	172.2	59.9	0	32.0	264.1
LuC3	175.8	61.3	0	32.6	269.7
LuC3B	162.9	56.7	0	30.2	249.8

A.3| IJ KING VAN DE WEEGSCHAAL

Tabel 10.2 geeft de resultaten weer van de ijking van de gebruikte weegschaal. Verschillende ijkgewichten werden een aantal keer gewogen. Uit het gemiddelde van de resultaten werd de afwijking per gewicht bepaald.

Tabel 10.2| IJking weegschaal

IJ KING WEEGSCHAAL				
IJKGEWICHTEN [g]	METING 1 [g]	METING 2 [g]	METING 3 [g]	AFWIJ KING [g]
10	10.3	9.8	10.0	0.03
20	19.8	19.7	19.8	-0.23
50	49.8	49.8	50.0	-0.13
100	99.9	99.8	99.8	-0.17
200	199.9	199.8	199.8	-0.17
500	498.1	498.0	497.9	-2.00

BIJLAGE B: CAPILLAIRE ABSORPTIEPROEF

B.1| PROEFOPSTELLING EN UITVOERING

De proefstukken werden op pianoscharnieren in een waterbak met constante diepte tussen 5 mm en 10 mm geplaatst. Horizontale stabiliteit van de proefstukken werd bekomen met behulp van plastic stelblokjes. Een constant waterpeil en voldoende circulatie van het water werd verkregen door middel van een trechtersysteem en opvangbak. Een afsluitend deksel verhinderde eventuele droging door diffusie. Figuren 10.4 en 10.5 illustreren bovenstaand principe.



Figuur 10.4| Overzichtsfoto proefopstelling



Figuur 10.5| Detail: horizontale stabiliteit proefstukken

B.2| RESULTATEN

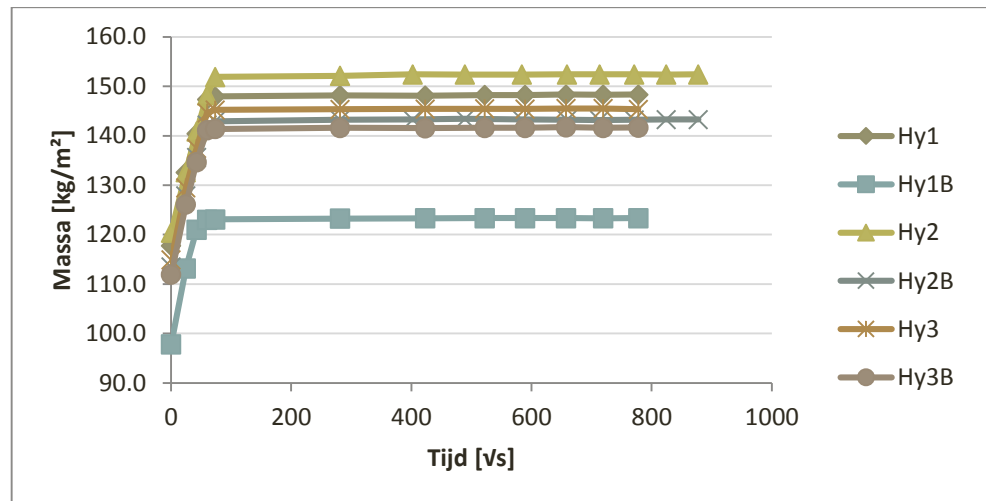
B.2.1| HYDRAULISCHE KALKMORTEL

De capillaire absorptietest op hydraulische kalkmortel werd in twee reeksen gedaan. Dit resulteerde in twee sets van data en verklaart de leemtes in de datatabel. Ter verduidelijking kreeg de tweede reeks datapunten een apostrof toegekend in de tijdsaanduiding (uiterst linkse kolom in de datatabel).

| DATATABEL

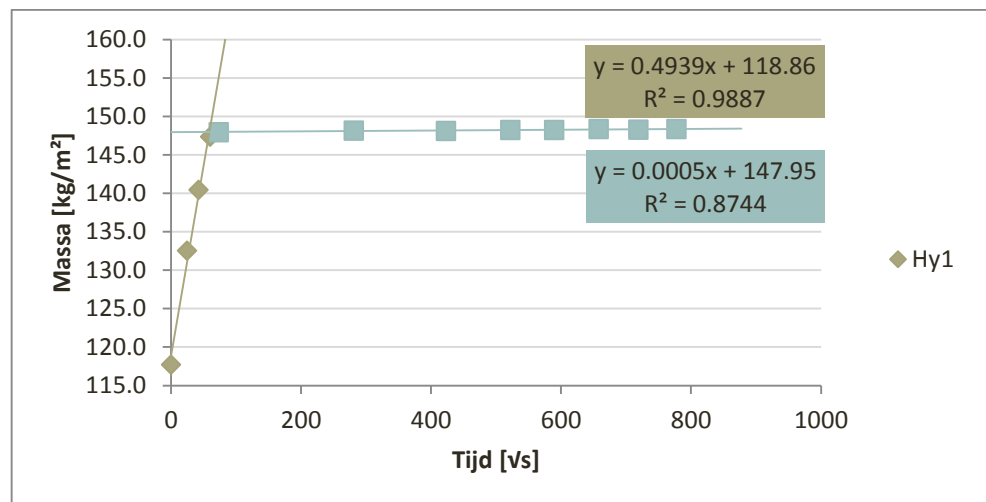
Tabel 10.3 Datatabel capillaire absorptieproef hydraulische kalkmortel							
	[√(s)]	Hy1	Hy1B	Hy2	Hy2B	Hy3	Hy3B
TEST	0.00	117.7	97.8	120.4	113.5	114.9	111.9
TEST	24.49	132.6	113.2	132.7	127.9	129.5	126.1
TEST	42.43	140.5	121.0	140.9	135.6	137.4	134.6
TEST	60.00	147.4	123.0	148.2	142.2	144.6	141.1
TEST	73.48	148.0	123.1	151.9	142.9	145.2	141.4
DAG 2	281.42			152.1	143.2		
DAG 3	402.49			152.4	143.3		
DAG 4	489.29			152.4	143.4		
DAG 2'	281.42	148.2	123.2			145.4	141.6
DAG 5	583.78			152.4	143.3		
DAG 3'	422.85	148.1	123.3			145.4	141.5
DAG 6	659.09			152.4	143.2		
DAG 4'	521.92	148.2	123.4			145.5	141.6
DAG 7	713.72			152.4	143.2		
DAG 5'	589.41	148.2	123.4			145.4	141.6
DAG 8	771.10			152.4	143.2		
DAG 6'	657.72	148.4	123.4			145.5	141.7
DAG 9	824.14			152.4	143.3		
DAG 7'	719.17	148.3	123.3			145.5	141.6
DAG 10	877.72			152.4	143.3		
DAG 8'	777.69	148.4	123.4			145.4	141.7
A [m²]		0.00176	0.00176	0.00164	0.00164	0.00168	0.00168

| GRAFIEK

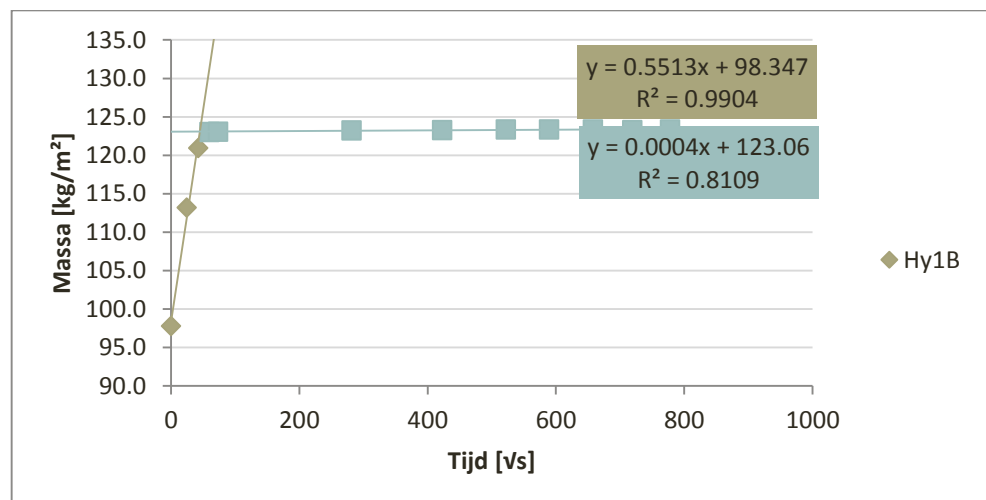


Figuur 10.6| Grafiek capillaire absorptieproef hydraulische kalkmortel

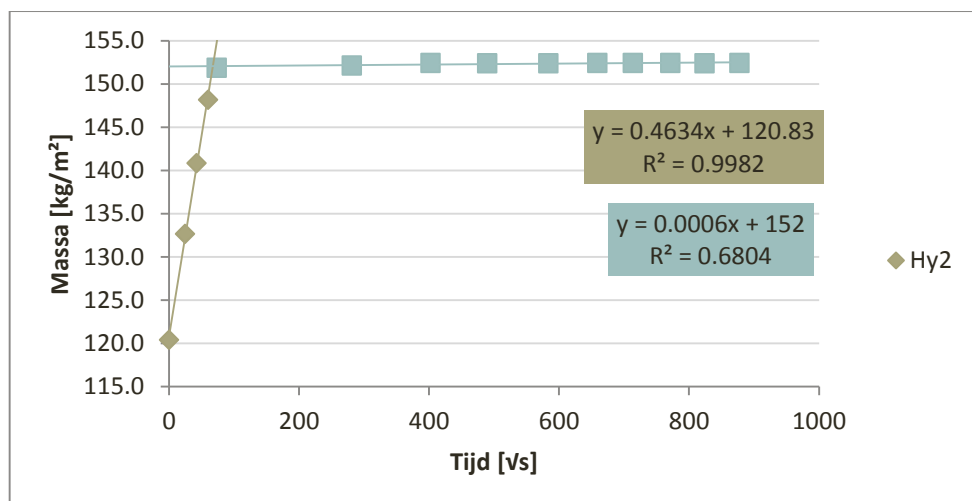
| TRENDLIJN



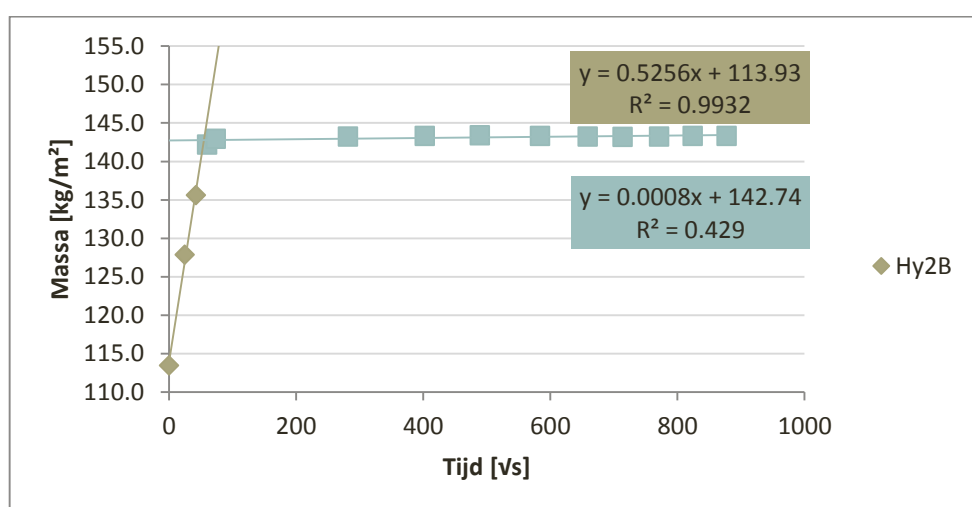
Figuur 10.7-A| Trendlijn capillaire absorptieproef hydraulische kalkmortel Hy1



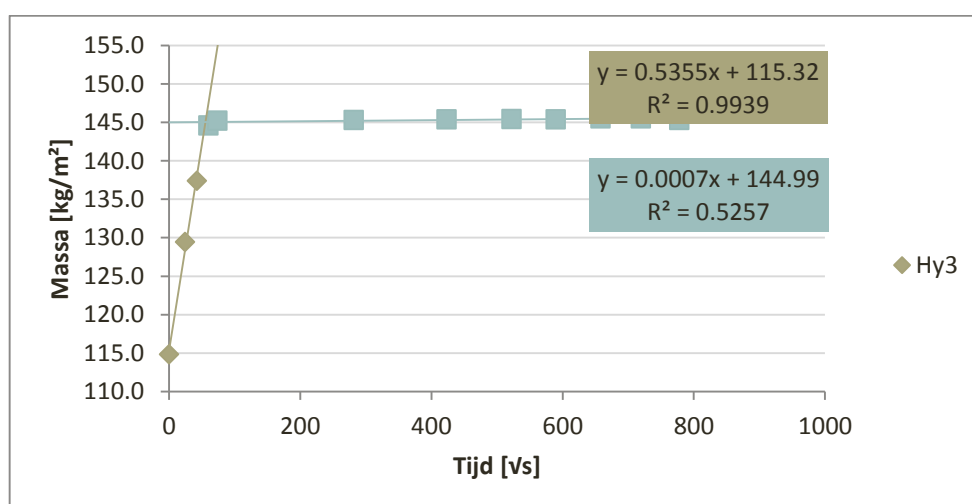
Figuur 10.7-B| Trendlijn capillaire absorptieproef hydraulische kalkmortel Hy1B



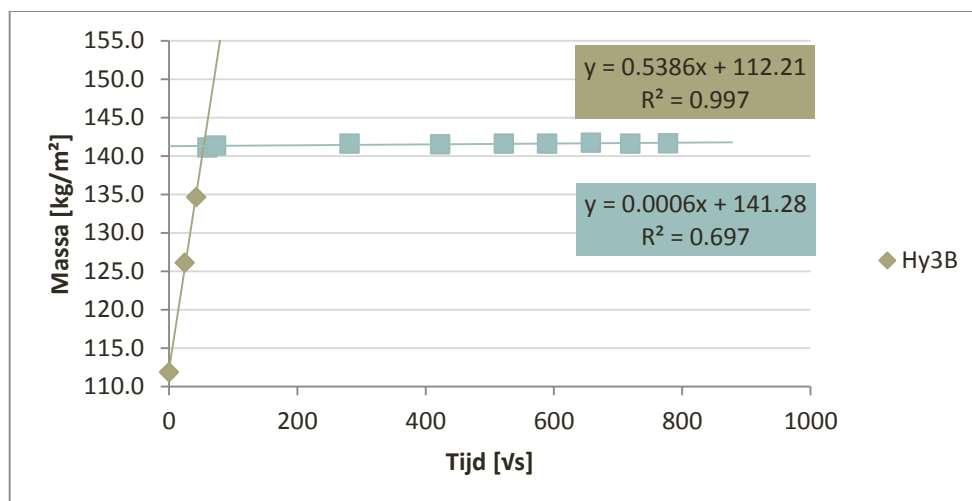
Figuur 10.7-C| Trendlijn capillaire absorptieproef hydraulische kalkmortel Hy2



Figuur 10.7-D| Trendlijn capillaire absorptieproef hydraulische kalkmortel Hy2B



Figuur 10.7-E| Trendlijn capillaire absorptieproef hydraulische kalkmortel Hy3



Figuur 10.7-F| Trendlijn capillaire absorptieproef hydraulische kalkmortel Hy3B

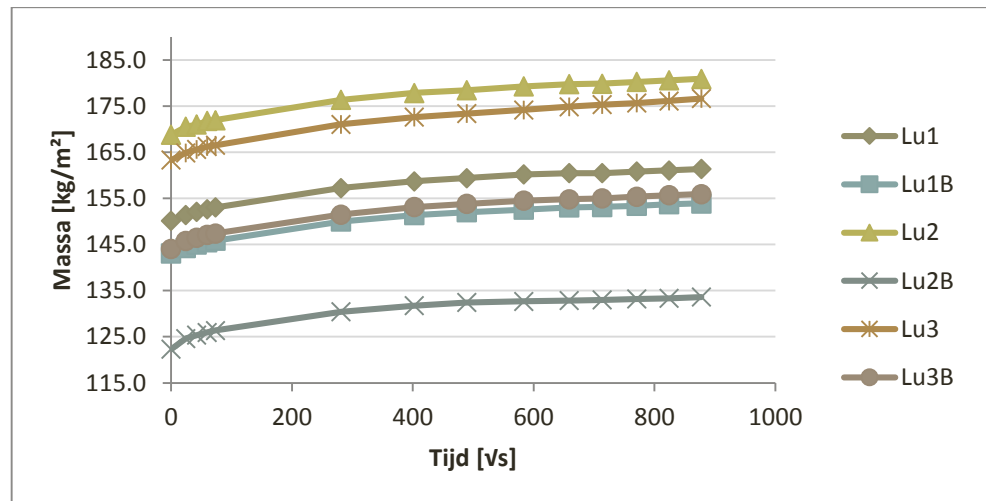
B.2.2| LUCHTKALKMORTEL

| DATATABEL

Tabel 10.4| Datatabel capillaire absorptieproef luchtkalkmortel

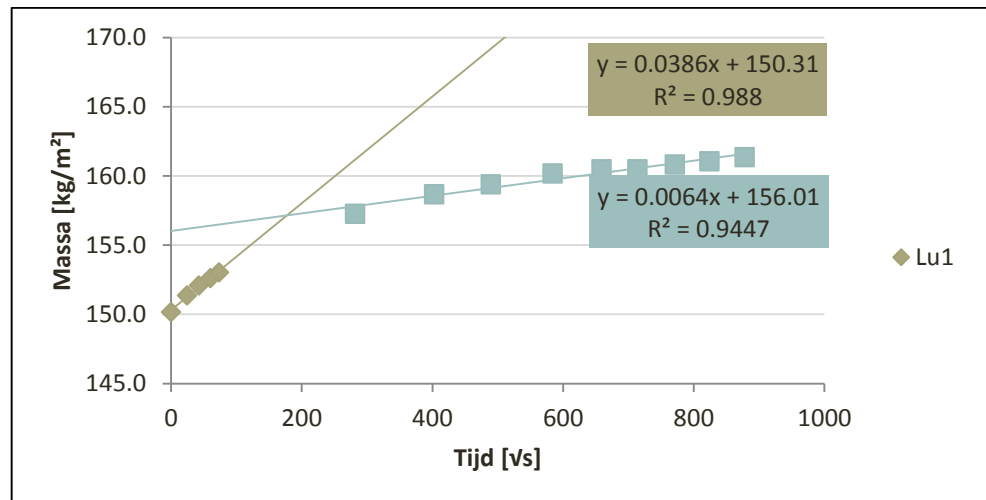
	[√(s)]	Lu1	Lu1B	Lu2	Lu2B	Lu3	Lu3B
TEST	0.00	150.2	143.1	168.8	122.3	163.3	144.1
TEST	24.49	151.4	144.3	170.5	124.6	164.9	145.8
TEST	42.43	152.1	145.0	171.0	125.4	165.6	146.5
TEST	60.00	152.6	145.5	171.8	126.0	166.3	147.1
TEST	73.48	153.0	145.8	172.0	126.4	166.5	147.4
DAG 2	281.42	157.3	150.0	176.4	130.4	171.1	151.5
DAG 3	402.49	158.7	151.4	177.9	131.7	172.6	153.1
DAG 4	489.29	159.4	152.0	178.5	132.4	173.4	153.8
DAG 5	583.78	160.2	152.6	179.3	132.7	174.2	154.5
DAG 6	659.09	160.5	153.0	179.8	132.9	174.9	154.8
DAG 7	713.72	160.5	153.2	179.9	133.0	175.3	155.0
DAG 8	771.10	160.8	153.4	180.2	133.2	175.7	155.4
DAG 9	824.14	161.1	153.8	180.6	133.3	176.1	155.7
DAG 10	877.72	161.4	153.9	180.9	133.6	176.6	155.9
A [m²]		0.00168	0.00168	0.00168	0.00168	0.0016	0.0016

| GRAFIEK

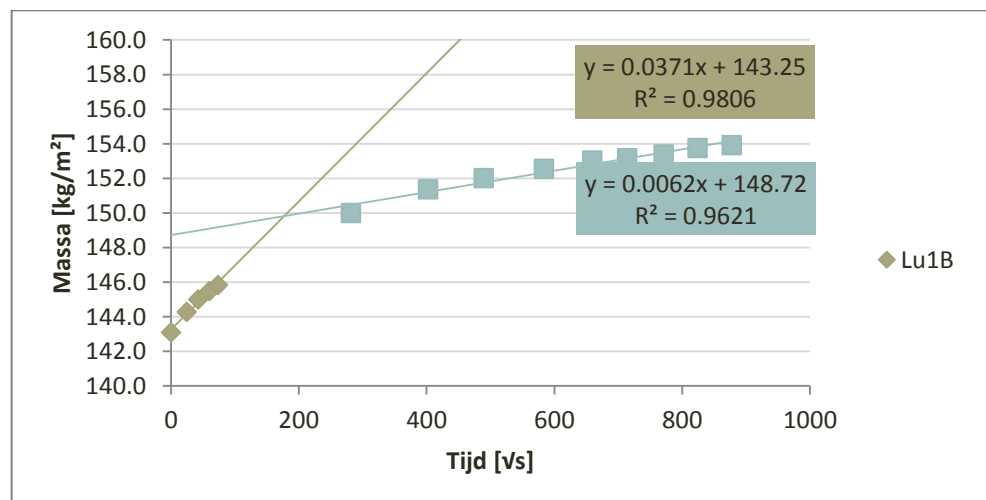


Figuur 10.8| Grafiek capillaire absorptieproef luchtkalkmortel

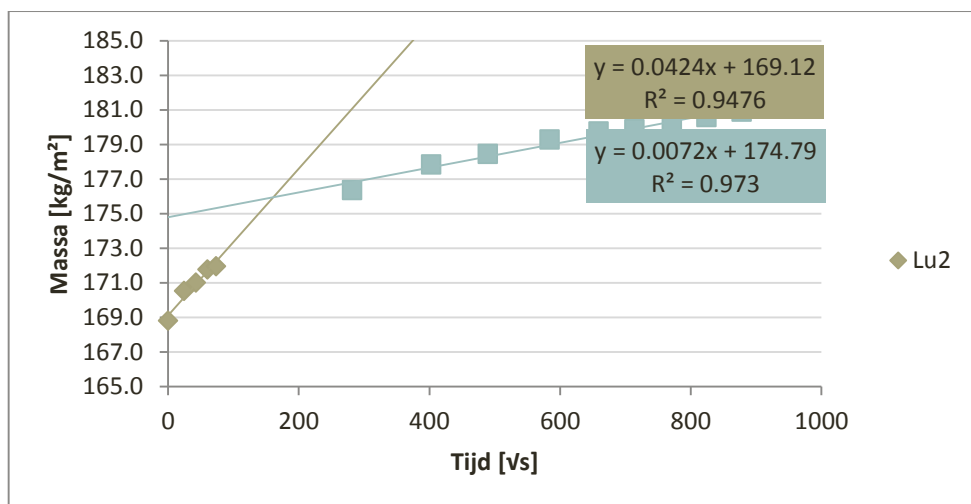
| TRENDLIJN



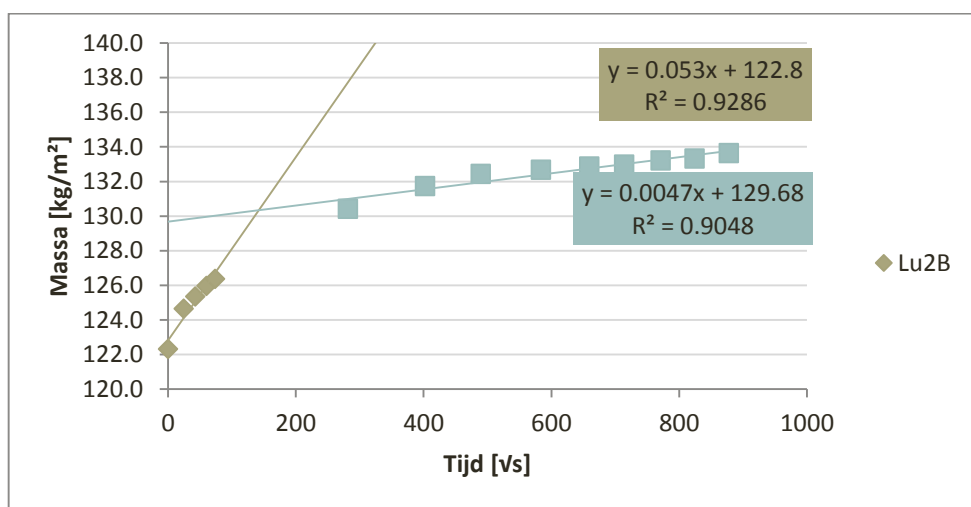
Figuur 10.9-A| Trendlijn capillaire absorptieproef luchtkalkmortel Lu1



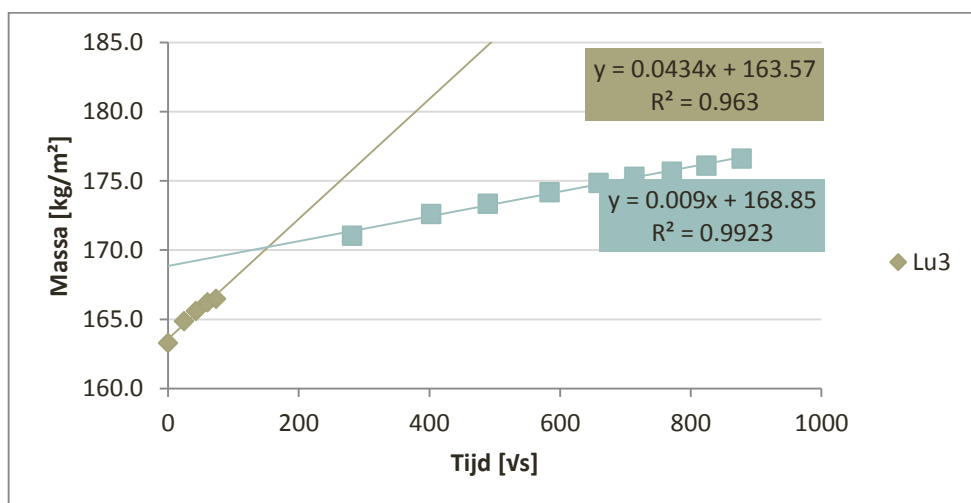
Figuur 10.9-B| Trendlijn capillaire absorptieproef luchtkalkmortel Lu1B



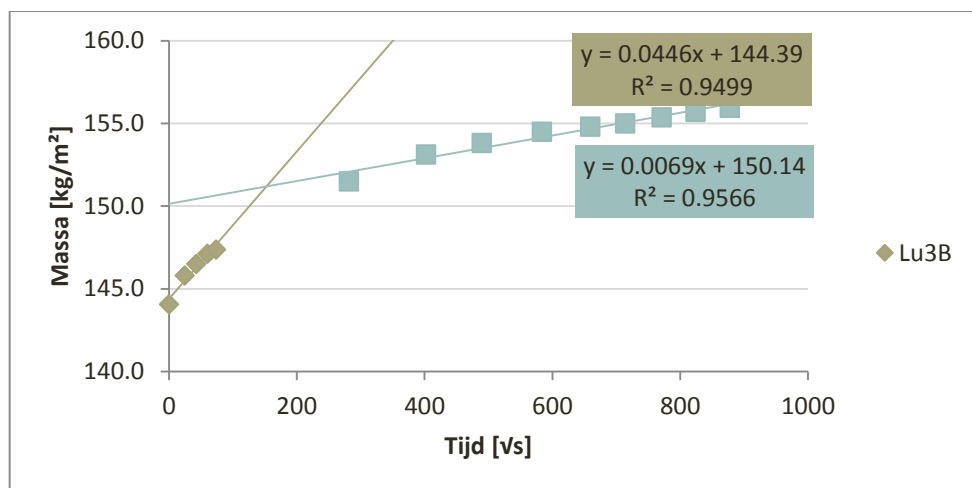
Figuur 10.9-C| Trendlijn capillaire absorptieproef luchtkalkmortel Lu2



Figuur 10.9-D| Trendlijn capillaire absorptieproef luchtkalkmortel Lu2B



Figuur 10.9-E| Trendlijn capillaire absorptieproef luchtkalkmortel Lu3



Figuur 10.9-F| Trendlijn capillaire absorptieproef luchtkalkmortel Lu3B

B.2.3| CEMENTMORTEL

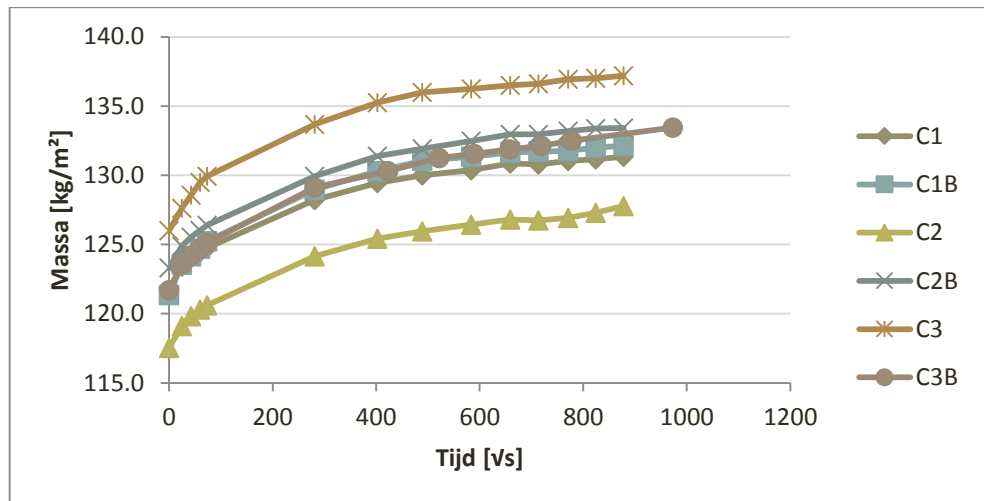
| DATATABEL

De capillaire absorptietest op cementmortel werd in twee reeksen gedaan. Ter verduidelijking kreeg de tweede reeks datapunten een apostrof toegekend in de tijdsaanduiding (uiterst linkse kolom in de datatabel).

Tabel 10.5| Datatabel capillaire absorptieproef cementmortel

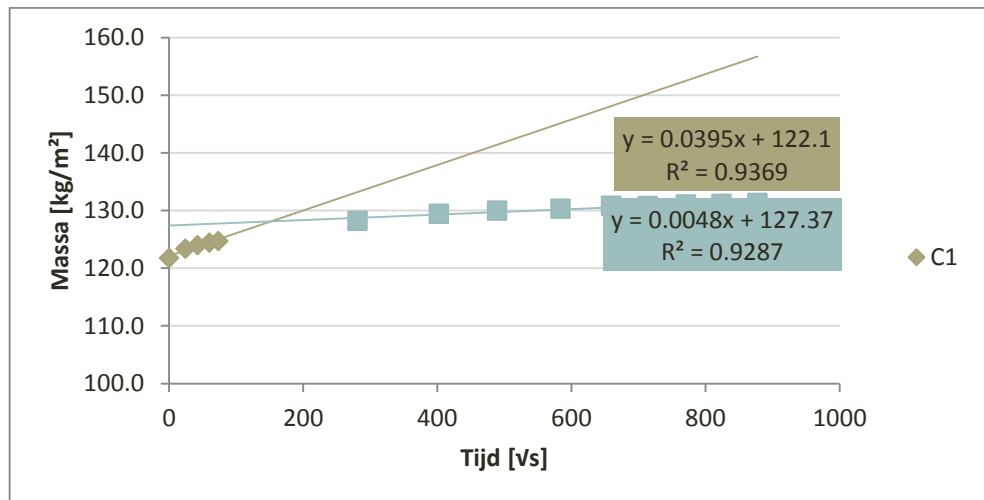
	[√(s)]	C1	C1B	C2	C2B	C3	C3B
TEST	0.00	121.8	121.3	117.5	123.3	126.0	121.7
TEST	24.49	123.4	123.5	119.1	124.9	127.6	123.6
TEST	42.43	124.0	124.1	119.8	125.5	128.6	124.2
TEST	60.00	124.5	124.7	120.3	126.0	129.5	124.7
TEST	73.48	124.8	125.2	120.6	126.4	129.9	125.1
DAG 2	281.42	128.2	129.0	124.2	129.9	133.7	
DAG 3	402.49	129.5	130.3	125.4	131.4	135.3	
DAG 4	489.29	130.0	131.0	126.0	131.9	136.0	
DAG 2'	281.42						129.1
DAG 5	583.78	130.4	131.3	126.4	132.5	136.3	
DAG 3'	422.85						130.3
DAG 6	659.09	130.9	131.6	126.8	133.0	136.5	
DAG 4'	521.92						131.3
DAG 7	713.72	130.8	131.7	126.7	133.0	136.6	
DAG 5'	589.41						131.6
DAG 8	771.10	131.0	131.8	126.9	133.2	136.9	
DAG 6'	657.72						131.9
DAG 9	824.14	131.2	132.0	127.3	133.4	137.0	
DAG 7'	719.17						132.1
DAG 10	877.72	131.3	132.1	127.8	133.4	137.2	
DAG 8'	777.69						132.5
DAG 12'	973.34						133.4
A [m²]		0.00164	0.00164	0.00166	0.00166	0.0016	0.0016

| GRAFIEK

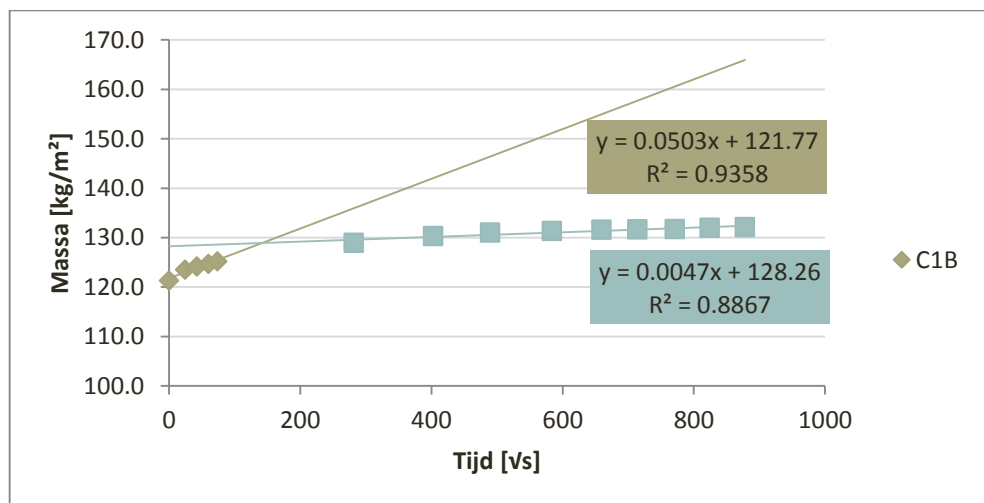


Figuur 10.10| Grafiek capillaire absorptieproef cementmortel

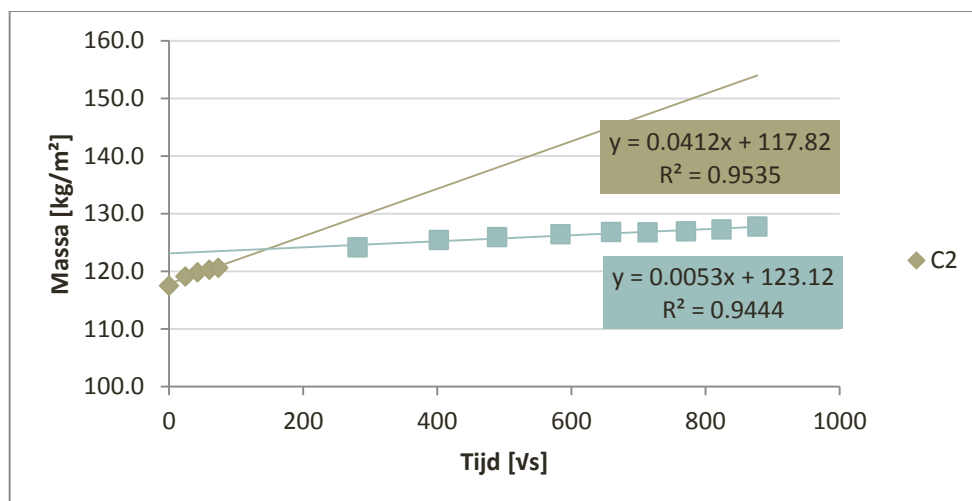
| TRENDLIJN



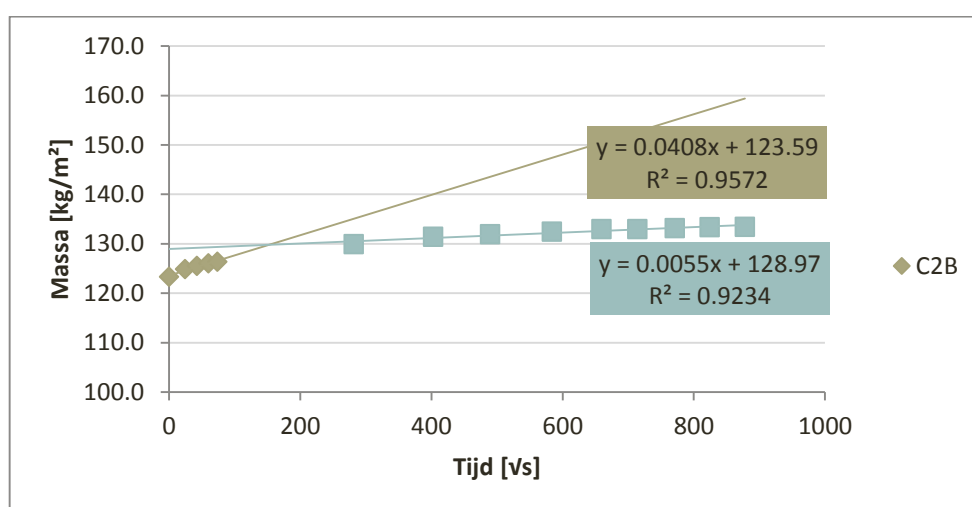
Figuur 10.11-A| Trendlijn capillaire absorptieproef cementmortel C1



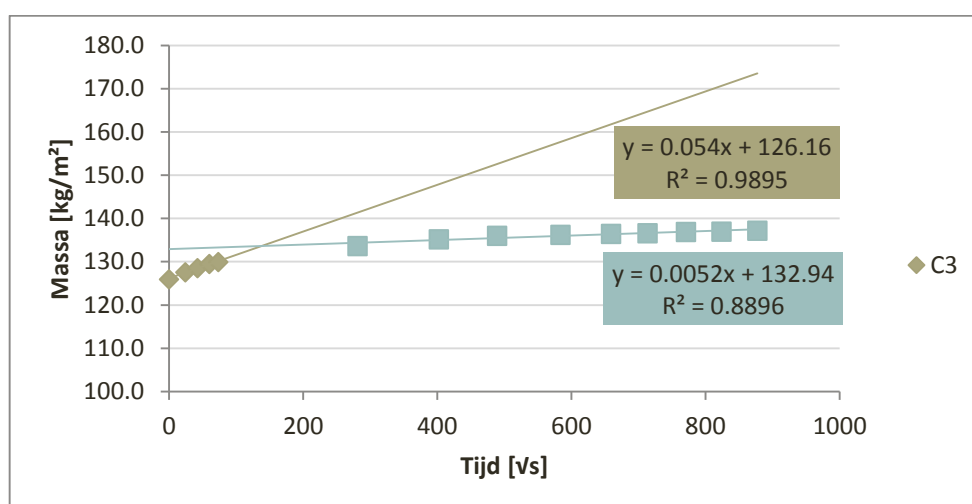
Figuur 10.11-B| Trendlijn capillaire absorptieproef cementmortel C1B



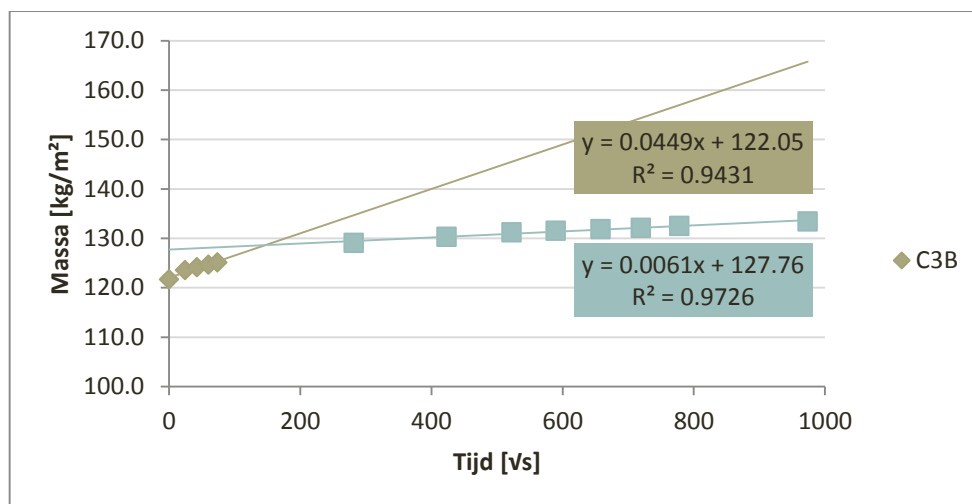
Figuur 10.11-C| Trendlijn capillaire absorptieproef cementmortel C2



Figuur 10.11-D| Trendlijn capillaire absorptieproef cementmortel C2B



Figuur 10.11-E| Trendlijn capillaire absorptieproef cementmortel C3



Figuur 10.11-F| Trendlijn capillaire absorptieproef cementmortel C3B

B.2.4| COMBINATIE MET HYDRAULISCHE KALKMORTEL

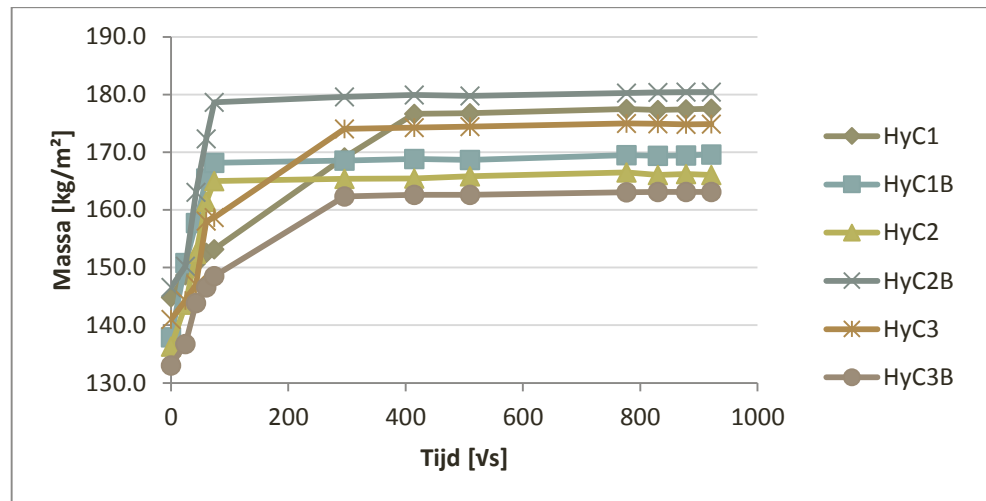
Aangezien het 'foutief restaureren' van hydraulische kalkmortel met cementmortel resulteerde in 'mislukte' proefstukken met een slechte hechting tussen beide mortels, werd ervoor gekozen om de proef licht gewijzigd uit te voeren. De hydraulische kalkmortel proefstukken werden los op de 2 cm dikke cementmortel schijfjes geplaatst, waarbij gezorgd werd dat enkel de cementmortel in aanraking kwam met het wateroppervlak. Op deze manier werd het mogelijk de massatoename per contactoppervlak van het volledige proefstuk als van de onderdelen op te meten. Tabellen 10.6 en 10.7 en bijhorende grafieken geven zowel de samengestelde als opgesplitste resultaten weer.

| DATATABEL COMBINATIE

Tabel 10.6| Datatabel capillaire absorptieproef combinatie met hydraulische kalkmortel

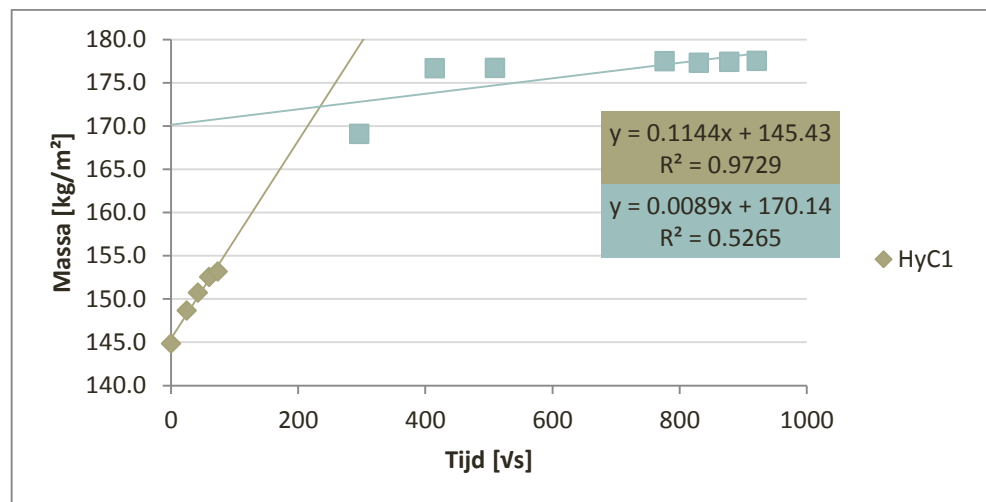
	[√(s)]	HyC1	HyC1B	HyC2	HyC2B	HyC3	HyC3B
TEST	0.00	144.9	137.9	136.3	146.6	141.0	133.0
TEST	24.49	148.7	150.8	143.6	150.3	144.3	136.8
TEST	42.43	150.8	157.8	152.4	163.1	147.1	143.9
TEST	60.00	152.6	165.4	161.4	172.3	158.1	146.6
TEST	73.48	153.2	168.2	165.0	178.7	158.7	148.5
DAG 2	295.97	169.1	168.6	165.4	179.6	174.1	162.3
DAG 3	414.97	176.7	168.8	165.4	179.9	174.3	162.6
DAG 4	509.71	176.8	168.7	165.8	179.8	174.4	162.6
DAG 8	776.53	177.5	169.5	166.5	180.3	175.0	163.1
DAG 9	830.30	177.3	169.4	166.1	180.4	174.9	163.1
DAG 10	878.07	177.4	169.4	166.3	180.4	174.8	163.1
DAG 11	921.41	177.6	169.6	166.1	180.4	174.9	163.1
A [m²]		0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016

| GRAFIEK COMBINATIE

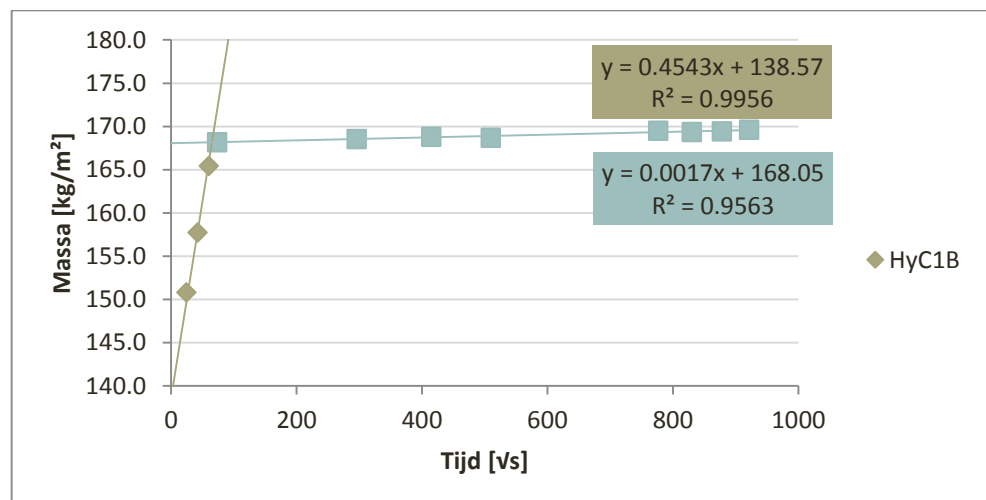


Figuur 10.12| Grafiek capillaire absorptieproef combinatie met hydraulische kalkmortel

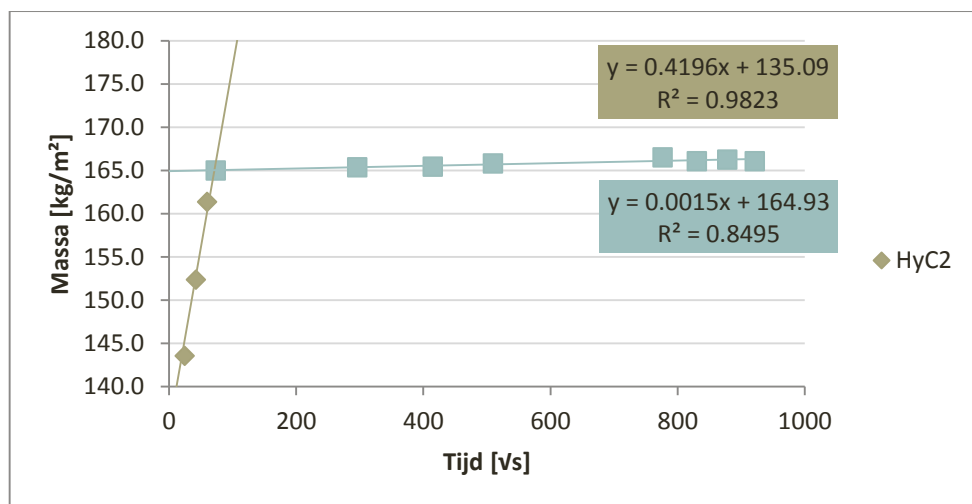
| TRENDLIJN COMBINATIE



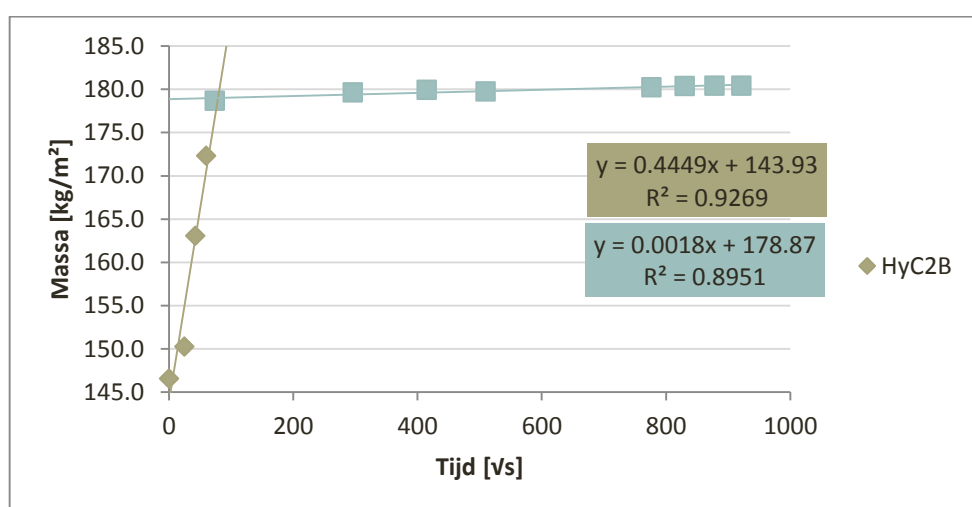
Figuur 10.13-A| Trendlijn capillaire absorptieproef combinatie met hydraulische kalkmortel HyC1



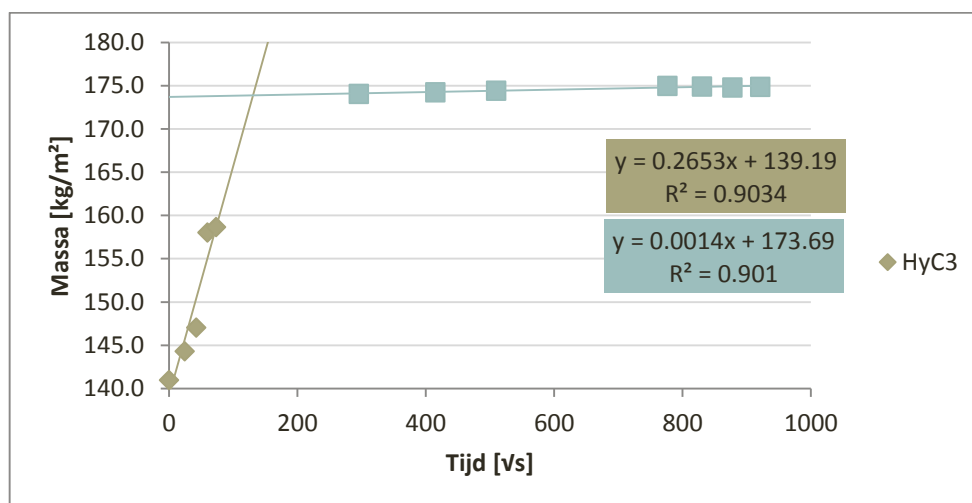
Figuur 10.13-B| Trendlijn capillaire absorptieproef combinatie met hydraulische kalkmortel HyC1B



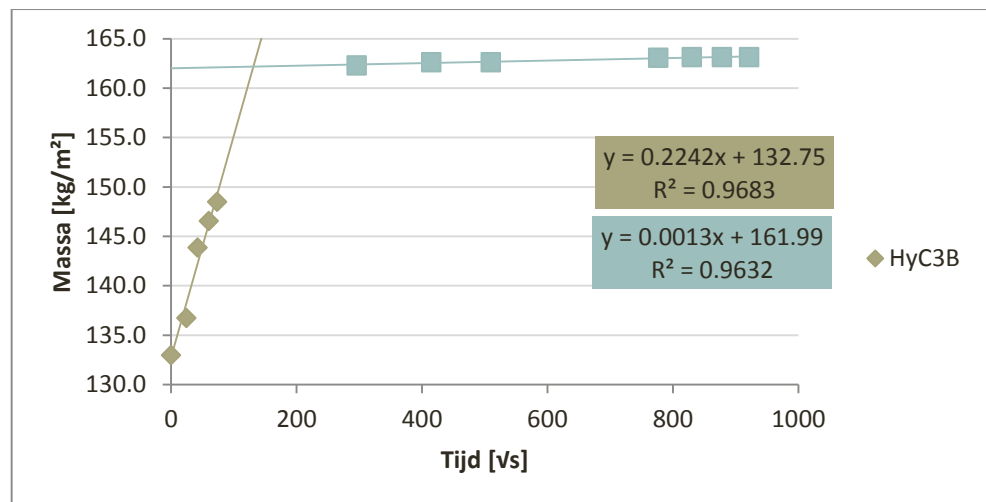
Figuur 10.13-C| Trendlijn capillaire absorptieproef combinatie met hydraulische kalkmortel HyC2



Figuur 10.13-D| Trendlijn capillaire absorptieproef combinatie met hydraulische kalkmortel HyC2B



Figuur 10.13-E| Trendlijn capillaire absorptieproef combinatie met hydraulische kalkmortel HyC3



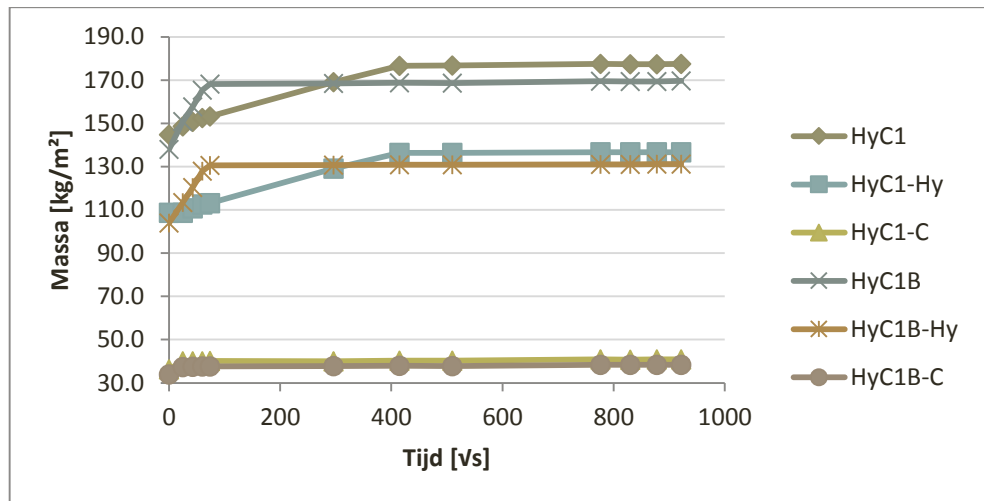
Figuur 10.13-F] Trendlijn capillaire absorptieproef combinatie met hydraulische kalkmortel HyC3B

| DATATABEL ONDERDELEN

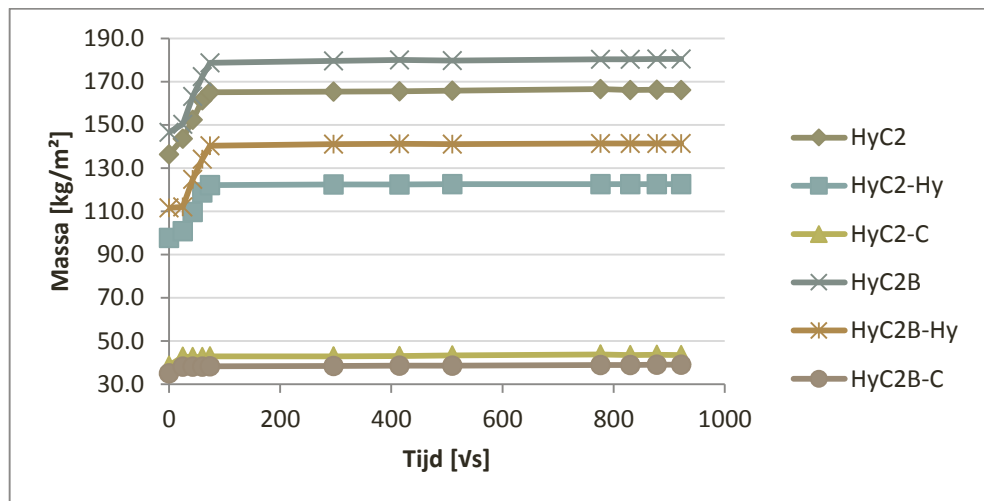
Tabel 10.7| Datatabel capillaire absorptieproef onderdelen combinatie met hydraulische kalkmortel

	[√(s)]	HyC1	-Hy	-C	HyC1B	-Hy	-C	HyC2	-Hy	-C	HyC2B	-Hy	-C	HyC3	-Hy	-C	HyC3B	-Hy	-C
TEST	0.00	144.9	108.6	36.3	137.9	104.0	33.9	136.3	97.6	38.7	146.6	111.6	35.0	141.0	107.1	33.9	133.0	96.1	36.9
TEST	24.49	148.7	108.6	40.1	150.8	113.5	37.3	143.6	100.8	42.8	150.3	112.1	38.1	144.3	107.5	36.8	136.8	96.4	40.4
TEST	42.43	150.8	110.8	39.9	157.8	120.3	37.4	152.4	109.7	42.7	163.1	124.8	38.3	147.1	110.3	36.8	143.9	103.5	40.4
TEST	60.00	152.6	112.5	40.1	165.4	127.9	37.6	161.4	118.8	42.6	172.3	134.2	38.1	158.1	121.1	36.9	146.6	106.1	40.4
TEST	73.48	153.2	113.1	40.1	168.2	130.6	37.6	165.0	122.1	42.9	178.7	140.3	38.4	158.7	121.8	36.9	148.5	108.0	40.5
DAG 2	295.97	169.1	129.1	40.1	168.6	130.8	37.8	165.4	122.4	42.9	179.6	141.1	38.5	174.1	137.0	37.1	162.3	121.7	40.6
DAG 3	414.97	176.7	136.4	40.3	168.8	130.9	37.9	165.4	122.4	43.1	179.9	141.3	38.7	174.3	137.1	37.2	162.6	121.8	40.9
DAG 4	509.71	176.8	136.4	40.3	168.7	130.9	37.8	165.8	122.5	43.3	179.8	141.1	38.6	174.4	137.1	37.4	162.6	121.8	40.9
DAG 8	776.53	177.5	136.7	40.8	169.5	131.1	38.4	166.5	122.6	43.9	180.3	141.3	38.9	175.0	137.2	37.8	163.1	121.9	41.2
DAG 9	830.30	177.3	136.6	40.7	169.4	131.1	38.3	166.1	122.5	43.6	180.4	141.4	38.9	174.9	137.2	37.8	163.1	121.9	41.3
DAG 10	878.07	177.4	136.6	40.8	169.4	131.1	38.3	166.3	122.6	43.6	180.4	141.4	39.0	174.8	137.3	37.6	163.1	121.9	41.2
DAG 11	921.41	177.6	136.7	40.9	169.6	131.2	38.4	166.1	122.5	43.6	180.4	141.4	39.1	174.9	137.3	37.6	163.1	121.9	41.3
A [m²]		0.0016			0.0016			0.0016			0.0016			0.0016			0.0016		

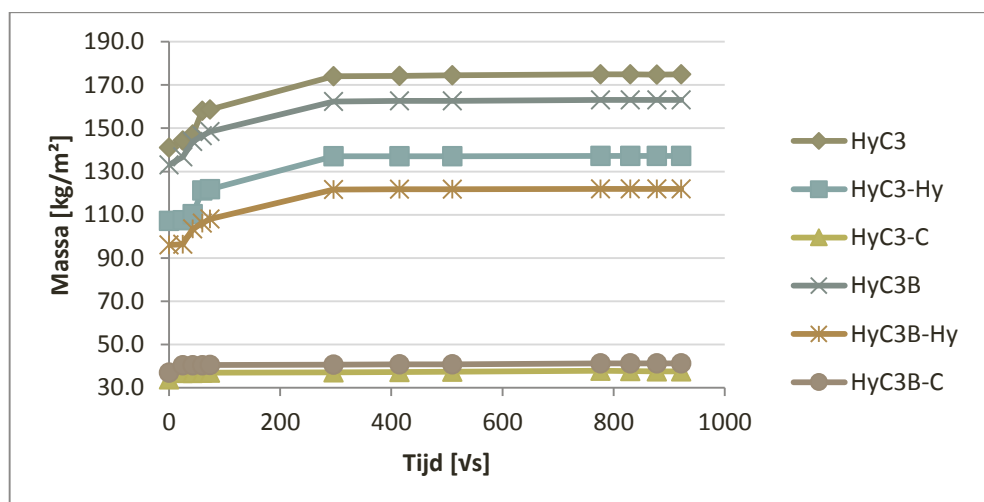
| GRAFIEK ONDERDELEN



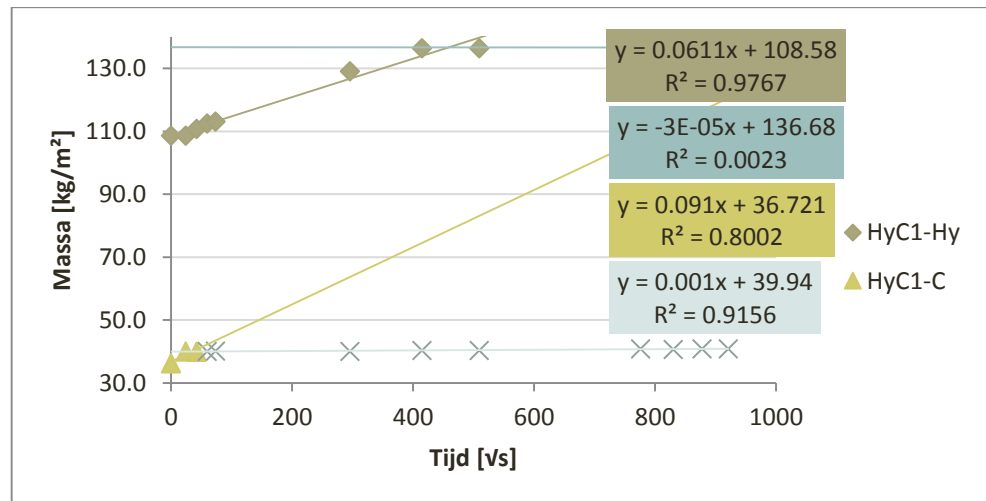
Figuur 10.14-A| Grafiek capillaire absorptieproef onderdelen HyC1 en HyC1B



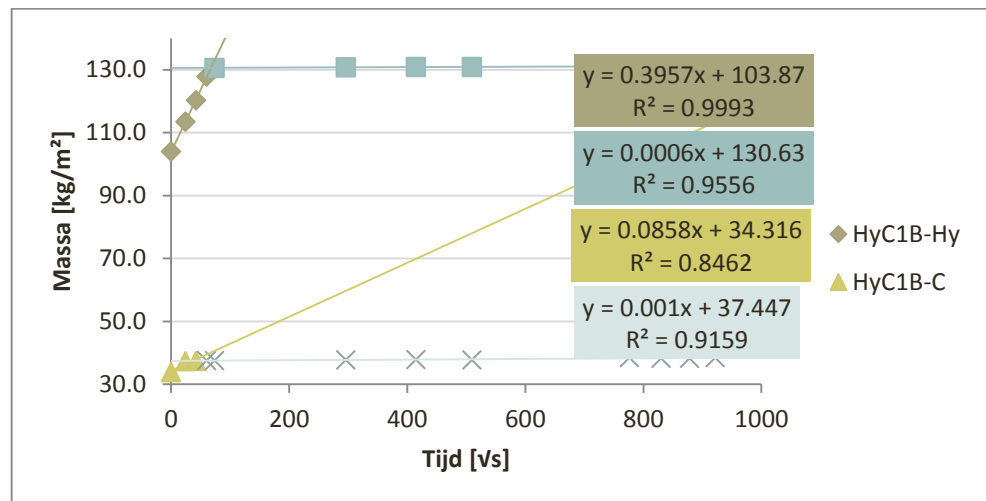
Figuur 10.14-B| Grafiek capillaire absorptieproef onderdelen HyC2 en HyC2B



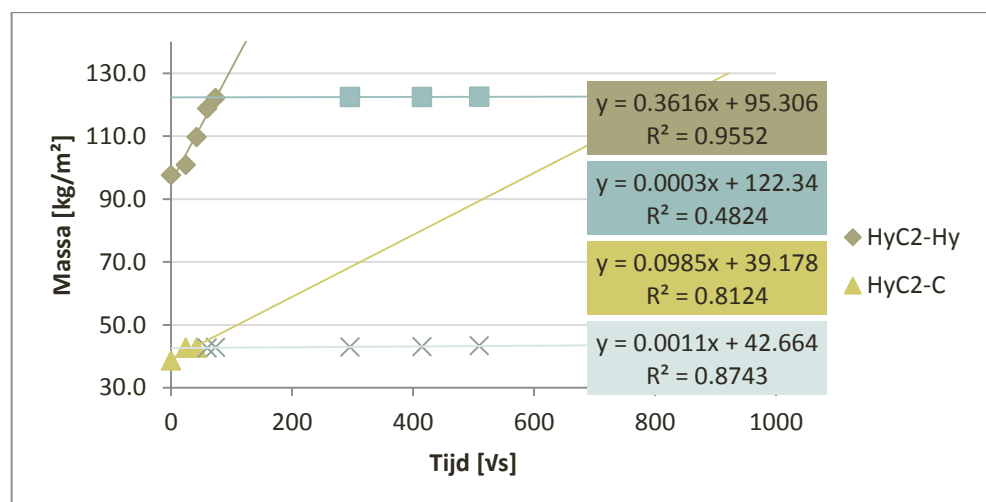
Figuur 10.14-C| Grafiek capillaire absorptieproef onderdelen HyC3 en HyC3B



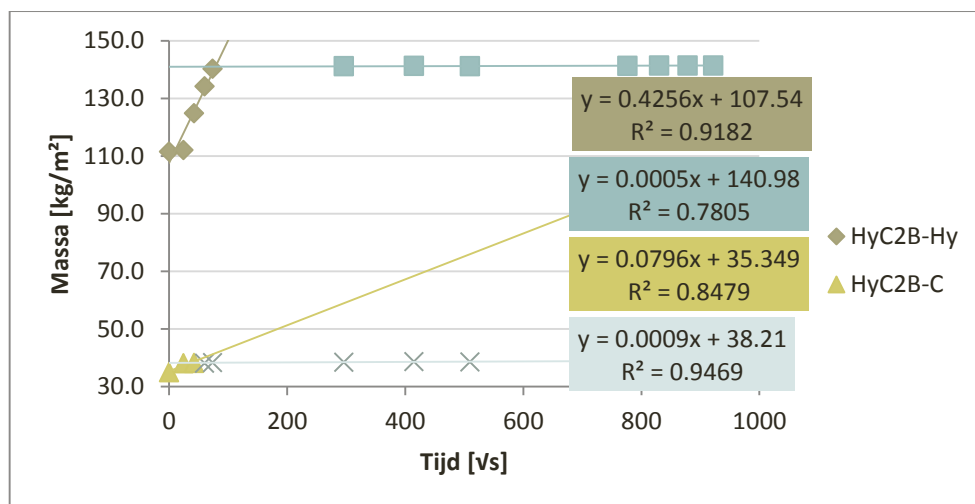
Figuur 10.15-A| Trendlijn capillaire absorptieproef onderdelen HyC1



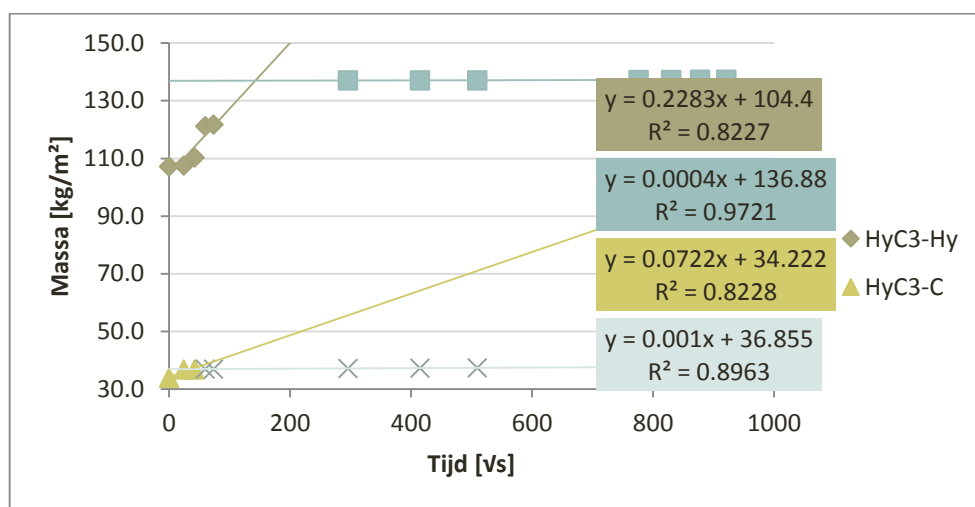
Figuur 10.15-B| Trendlijn capillaire absorptieproef onderdelen HyC1B



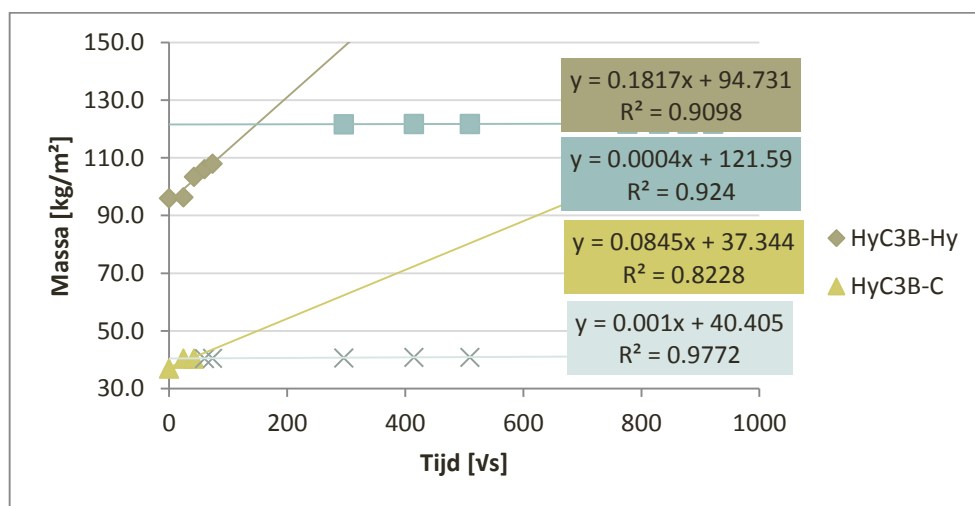
Figuur 10.15-C| Trendlijn capillaire absorptieproef onderdelen HyC2



Figuur 10.15-D| Trendlijn capillaire absorptieproef onderdelen HyC2B



Figuur 10.15-E| Trendlijn capillaire absorptieproef onderdelen HyC3



Figuur 10.15-F| Trendlijn capillaire absorptieproef onderdelen HyC3B

B.2.5| COMBINATIE MET LUCHTKALKMORTEL

Bij enkele van de proefstukken bleek de hechting tussen beide mortels relatief zwak. Tijdens het eerste halfuur van de proef zijn bij twee van de zes proefstukjes beide mortels los gekomen van elkaar. Bij deze proefstukjes werd ervoor gekozen om, net zoals bij de combinatie met hydraulische kalkmortel, de proef licht gewijzigd uit te voeren. Ook hier werden beide onderdelen los op elkaar geplaatst. Dit liet toe, bij deze twee proefstukken, de massatoename per contactoppervlak van beide onderdelen op te meten. Tabellen 10.8 en 10.9 en bijhorende grafieken geven zowel de samengestelde als opgesplitste resultaten weer.

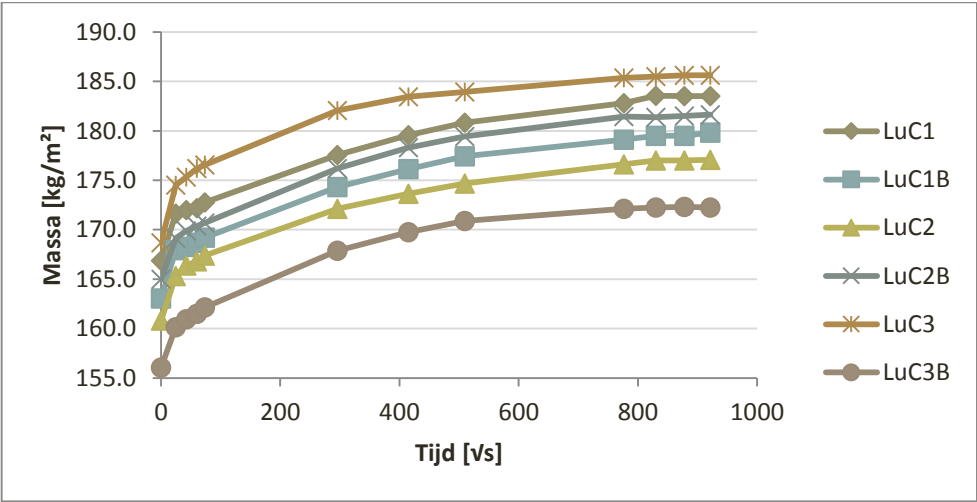
| DATATABEL COMBINATIE

Tabel 10.8		Datatabel capillaire absorptieproef combinatie met luchtkalkmortel					
	[√(s)]	LuC1	LuC1B	LuC2	LuC2B	LuC3	LuC3B
TEST	0.00	166.9	163.1	160.8	165.0	168.7	156.1
TEST	24.49	171.6	167.9	165.3	169.1	174.5	160.1
TEST	42.43	172.0	168.3	166.4	169.9	175.3	160.9
TEST	60.00	172.2	168.7	166.8	170.4	176.2	161.5
TEST	73.48	172.8	169.2	167.4	170.7	176.6	162.1
DAG 2	295.97	177.6	174.3	172.1	176.2	182.1	167.9
DAG 3	414.97	179.6	176.1	173.6	178.3	183.4	169.8
DAG 4	509.71	180.8	177.4	174.7	179.4	183.9	170.9
DAG 8	776.53	182.8	179.1	176.6	181.4	185.4	172.1
DAG 9	830.30	183.6	179.5	177.0	181.4	185.5	172.3
DAG 10	878.07	183.5	179.5	177.0	181.5	185.6	172.3
DAG 11	921.41	183.5	179.8	177.1	181.6	185.6	172.3

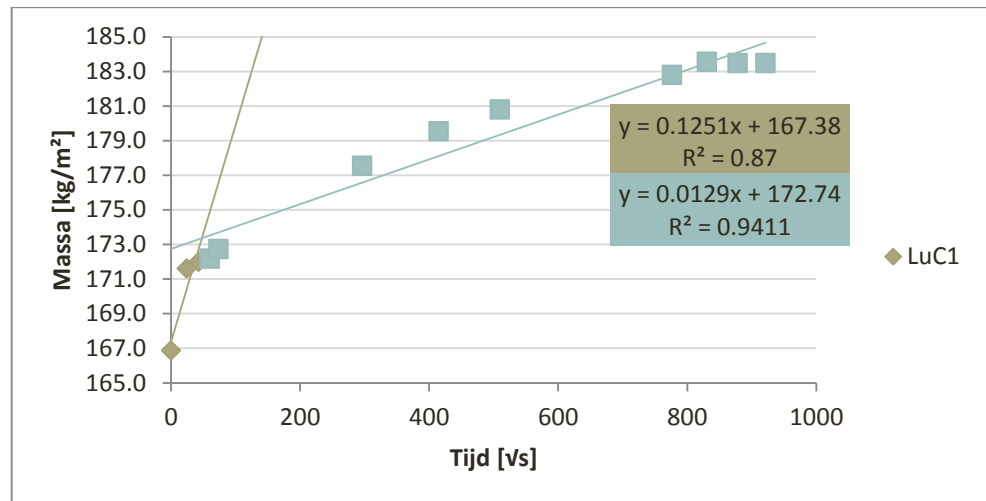
A [m²]

0.00160.00160.00160.00160.00160.0016

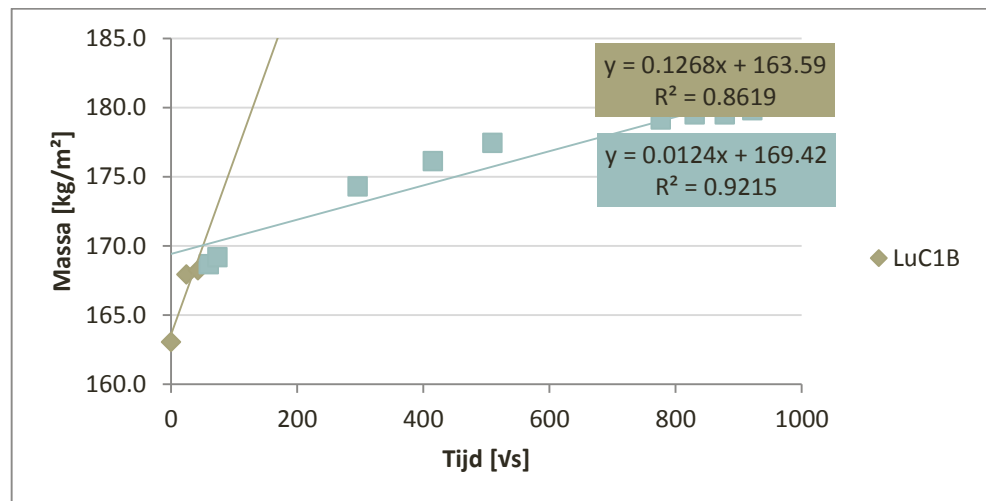
| GRAFIEK COMBINATIE



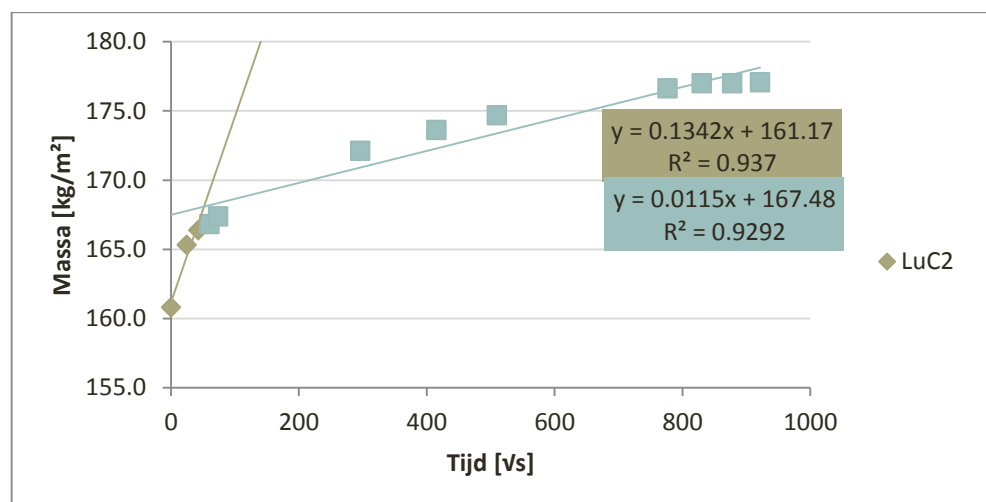
Figuur 10.16| Grafiek capillaire absorptieproef combinatie met luchtkalkmortel



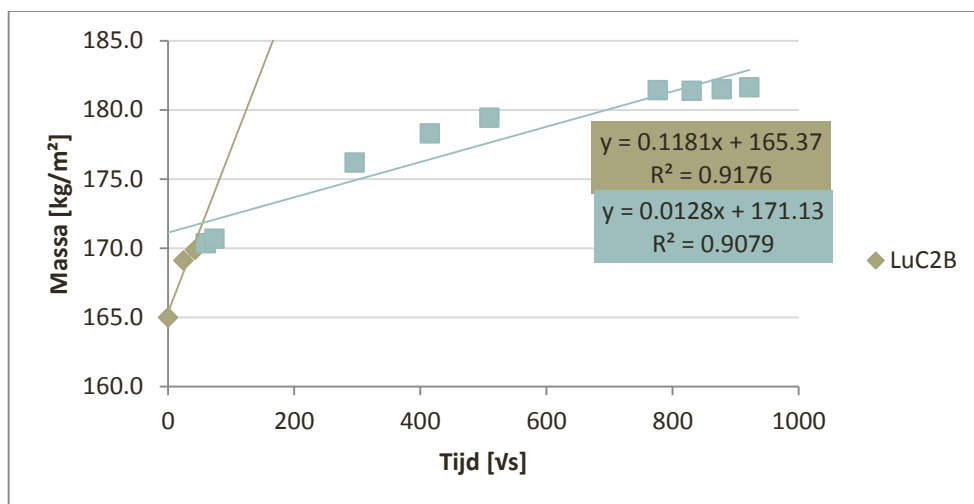
Figuur 10.17-A| Trendlijn capillaire absorptieproef combinatie met luchtkalkmortel LuC1



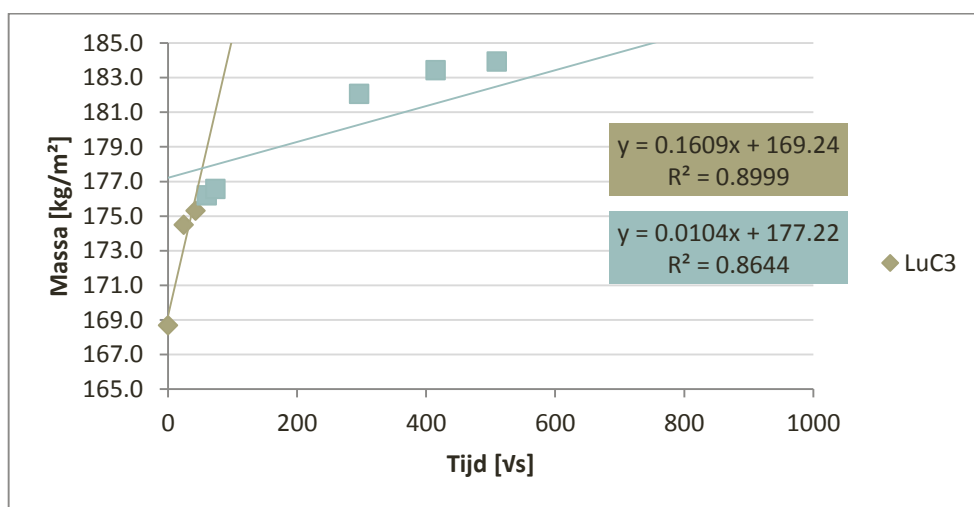
Figuur 10.17-B| Trendlijn capillaire absorptieproef combinatie met luchtkalkmortel LuC1B



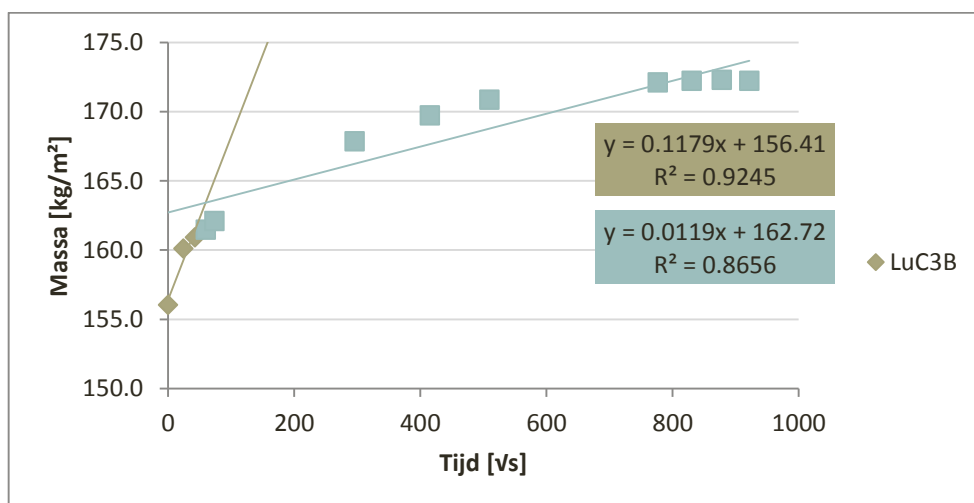
Figuur 10.17-C| Trendlijn capillaire absorptieproef combinatie met luchtkalkmortel LuC2



Figuur 10.17-D| Trendlijn capillaire absorptieproef combinatie met luchtkalkmortel LuC2B



Figuur 10.17-E| Trendlijn capillaire absorptieproef combinatie met luchtkalkmortel LuC3



Figuur 10.17-F| Trendlijn capillaire absorptieproef combinatie met luchtkalkmortel LuC3B

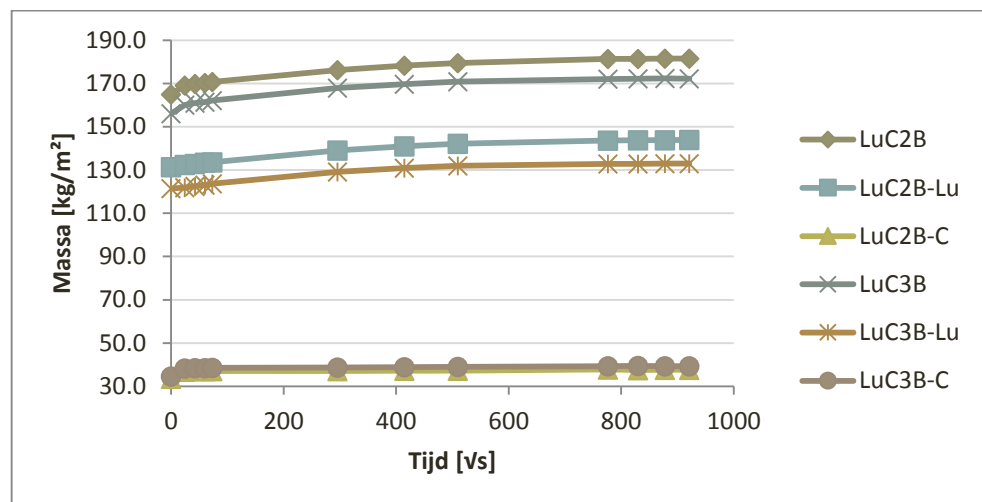
| DATATABEL ONDERDELEN

Tabel 10.9| Datatabel capillaire absorptieproef onderdelen combinatie met luchtkalkmortel

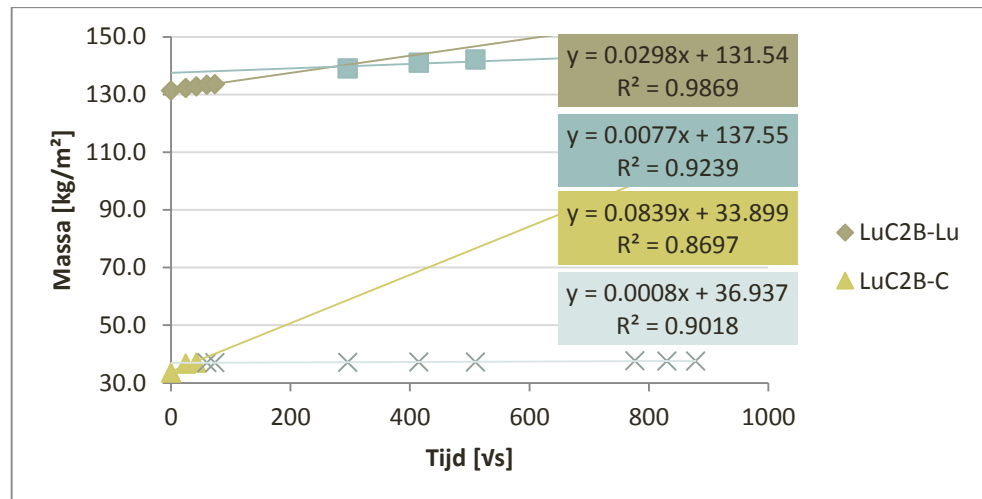
	$\sqrt{t}$ [s]	LuC2B	LuC2B-Lu	LuC2B-C	LuC3B	LuC3B-Lu	LuC3B-C
TEST	0.00	165.0	131.4	33.6	156.1	121.4	34.6
TEST	24.49	169.1	132.4	36.8	160.1	121.9	38.3
TEST	42.43	169.9	132.9	37.0	160.9	122.5	38.4
TEST	60.00	170.4	133.4	37.0	161.5	123.1	38.4
TEST	73.48	170.7	133.6	37.1	162.1	123.6	38.5
DAG 2	295.97	176.2	139.1	37.1	167.9	129.1	38.8
DAG 3	414.97	178.3	141.1	37.3	169.8	130.9	38.9
DAG 4	509.71	179.4	142.2	37.3	170.9	131.9	38.9
DAG 8	776.53	181.4	143.7	37.8	172.1	132.8	39.3
DAG 9	830.30	181.4	143.8	37.6	172.3	132.9	39.4
DAG 10	878.07	181.5	143.9	37.6	172.3	133.1	39.3
DAG 11	921.41	181.6	143.9	37.7	172.3	132.9	39.3

A [m²] 0.0016 0.0016

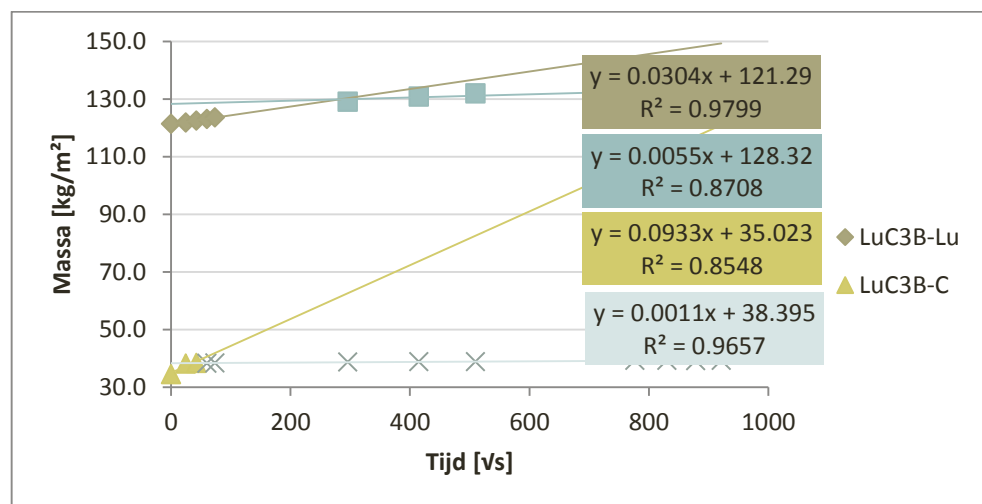
| GRAFIEK ONDERDELEN



Figuur 10.18| Grafiek capillaire absorptieproef onderdelen LuC2B en LuC3B



Figuur 10.19-A| Trendlijn capillaire absorptieproef onderdelen LuC2B



Figuur 10.19-B| Trendlijn capillaire absorptieproef onderdelen LuC3B

Tabel 10.10| Overzichtstabel resultaten capillaire absorptieproef

HYDRAULISCHE KALK							
Remmers KALK ®	TRENDLIJN	R ²	A _w [kg/m ² s ^{0.5}]	NBN A _w [kg/m ² s ^{0.5}]	VERHOUDING [%]	SNIJPUNT	w _c [kg/m ²]
Hy1	y = 0.4939x + 118.86	0.9887	0.4939	0.3499	70.84	x=58.96	147.98
Hy1B	y = 0.5513x + 98.347	0.9904	0.5513	0.2246	40.74	x=44.86	123.08
Hy2	y = 0.4634x + 120.83	0.9982	0.4634	0.4067	87.76	x=67.48	152.10
Hy2B	y = 0.5256x + 113.93	0.9932	0.5256	0.3189	60.67	x=54.90	142.78
Hy3	y = 0.5355x + 115.32	0.9939	0.5355	0.3421	63.88	x=55.48	145.03
Hy3B	y = 0.5386x + 112.21	0.9970	0.5386	0.3305	61.36	x=54.03	141.31
LUCHTKALK							
Cantillana Tradimur ®	TRENDLIJN	R ²	A _w [kg/m ² s ^{0.5}]	NBN A _w [kg/m ² s ^{0.5}]	VERHOUDING [%]	SNIJPUNT	w _c [kg/m ²]
Lu1	y = 0.0386x + 150.31	0.9880	0.0386	0.0361	93.52	x=177.02	157.14
Lu1B	y = 0.0371x + 143.25	0.9806	0.0371	0.0336	90.57	x=177.02	149.82
Lu2	y = 0.0424x + 169.12	0.9476	0.0424	0.0310	73.11	x=161.08	175.95
Lu2B	y = 0.0530x + 122.80	0.9286	0.0530	0.0374	70.57	x=142.03	130.35
Lu3	y = 0.0434x + 163.57	0.9630	0.0434	0.0336	77.42	x=153.49	170.23
Lu3B	y = 0.0446x + 144.39	0.9499	0.0446	0.0323	72.42	x=152.52	151.19
CEMENT							
Cantillana Mur 8/2 ®	TRENDLIJN	R ²	A _w [kg/m ² s ^{0.5}]	NBN A _w [kg/m ² s ^{0.5}]	VERHOUDING [%]	SNIJPUNT	w _c [kg/m ²]
C1	y = 0.0395x + 122.10	0.9369	0.0395	0.0284	71.90	x=134.58	128.01
C1B	y = 0.0503x + 121.77	0.9358	0.0503	0.0361	71.77	x=142.32	128.93
C2	y = 0.0412x + 117.82	0.9535	0.0412	0.0323	78.40	x=147.63	123.90
C2B	y = 0.0408x + 123.59	0.9572	0.0408	0.0323	79.17	x=152.41	129.81
C3	y = 0.0540x + 126.16	0.9895	0.0540	0.0478	88.52	x=138.93	133.66
C3B	y = 0.0449x + 122.05	0.9431	0.0449	0.0323	71.94	x=147.16	128.66
COMBINATIES							
Met hydraulische kalk	TRENDLIJN	R ²	A _w [kg/m ² s ^{0.5}]	NBN A _w [kg/m ² s ^{0.5}]	VERHOUDING [%]	SNIJPUNT	w _c [kg/m ²]
HyC1	y = 0.1144x + 145.43	0.9729	0.1144	0.0930	81.29	x=234.22	172.23
HyC1B	y = 0.4543x + 138.57	0.9956	0.4543	0.3460	76.16	x=65.135	168.16
HyC2	y = 0.4196x + 135.09	0.9823	0.4196	0.4428	105.5	x=71.370	165.04
HyC2B	y = 0.4449x + 143.93	0.9269	0.4449	0.5874	132.0	x=78.854	179.01
HyC3	y = 0.2653x + 139.19	0.9034	0.2653	0.2969	111.9	x=130.73	173.87
HyC3B	y = 0.2242x + 132.75	0.9683	0.2242	0.2427	108.3	x=131.18	162.16
Met luchtkalk	TRENDLIJN	R ²	A _w [kg/m ² s ^{0.5}]	NBN A _w [kg/m ² s ^{0.5}]	VERHOUDING [%]	SNIJPUNT	w _c [kg/m ²]

LuC1	$y = 0.1251x + 167.38$	0.8700	0.1251	0.0232	18.55	$x=44.772$	173.36
LuC1B	$y = 0.1268x + 163.59$	0.8619	0.1268	0.0258	20.35	$x=50.962$	170.05
LuC2	$y = 0.1342x + 161.17$	0.9370	0.1342	0.0426	31.74	$x=51.426$	168.07
LuC2B	$y = 0.1181x + 165.37$	0.9176	0.1181	0.0323	27.35	$x=54.701$	171.83
LuC3	$y = 0.1609x + 169.24$	0.8999	0.1609	0.0426	26.48	$x=53.023$	177.77
LuC3B	$y = 0.1179x + 156.41$	0.9245	0.1179	0.0413	35.03	$x=59.528$	163.43
ONDERDELEN VAN COMBINATIES							
Met hydraulische kalk	TRENDLIJN	R ²	A _w [kg/m ² s ^{0.5}]	NBN A _w [kg/m ² s ^{0.5}]	VERHOUDING [%]	-	-
HyC1	$y = 0.1144x + 145.43$	0.9729	0.1144	0.0930	81.29	-	-
Hy	$y = 0.0611x + 108.58$	0.9767	0.0611	0.0917	150.1	-	-
C	$y = 0.0910x + 36.721$	0.8002	0.0910	0.0013	1.429	-	-
HyC1B	$y = 0.4543x + 138.57$	0.9956	0.4543	0.3460	76.16	-	-
Hy	$y = 0.3957x + 103.87$	0.9993	0.3957	0.3537	89.39	-	-
C	$y = 0.0858x + 34.316$	0.8462	0.0858	0.0052	6.061	-	-
HyC2	$y = 0.4196x + 135.09$	0.9823	0.4196	0.4428	105.5	-	-
Hy	$y = 0.3616x + 95.306$	0.9552	0.3616	0.4402	121.7	-	-
C	$y = 0.0985x + 39.178$	0.8124	0.0985	0.0026	2.640	-	-
HyC2B	$y = 0.4449x + 143.93$	0.9269	0.4449	0.5874	132.0	-	-
Hy	$y = 0.4256x + 107.54$	0.9182	0.4256	0.5822	136.8	-	-
C	$y = 0.0796x + 35.349$	0.8479	0.0796	0.0052	6.533	-	-
HyC3	$y = 0.2653x + 139.19$	0.9034	0.2653	0.2969	111.9	-	-
Hy	$y = 0.2283x + 104.40$	0.8227	0.2283	0.2943	128.9	-	-
C	$y = 0.0722x + 34.222$	0.8228	0.0722	0.0026	3.601	-	-
HyC3B	$y = 0.2242x + 132.75$	0.9683	0.2242	0.2427	108.3	-	-
Hy	$y = 0.1817x + 94.731$	0.9098	0.1817	0.2401	132.1	-	-
C	$y = 0.0845x + 37.344$	0.8228	0.0845	0.0026	3.077	-	-
Met luchtkalk	TRENDLIJN	R ²	A _w [kg/m ² s ^{0.5}]	NBN A _w [kg/m ² s ^{0.5}]	VERHOUDING [%]	-	-
LuC2B	$y = 0.1181x + 165.37$	0.9176	0.1181	0.0323	27.35	-	-
Lu	$y = 0.0298x + 131.54$	0.9869	0.0298	0.0258	86.58	-	-
C	$y = 0.0839x + 33.899$	0.8697	0.0839	0.0065	7.747	-	-
LuC3B	$y = 0.1179x + 156.41$	0.9245	0.1179	0.0413	35.03	-	-
Lu	$y = 0.0304x + 121.29$	0.9799	0.0304	0.0361	118.8	-	-
C	$y = 0.0933x + 35.023$	0.8548	0.0933	0.0052	5.573	-	-

BIJLAGE C: MATERIAALDATA

C.1| POROSITEIT

Tabel 10.11| Overzichtstabel resultaten porositeiten

HYDRAULISCHE KALK								
Remmers KALK ®	V [m³]	m _{droog} [kg]	ρ [kg/m³]	m _{cap} [kg]	m _{eff} [kg]	f _{cap} [kg/kg]	f _{eff} [kg/kg]	f [kg/kg]
Hy1	0.00014	0.2072	1457.923	0.2594	0.2611	0.201	0.206	0.379
Hy1B	0.00012	0.1721	1470.437	0.2129	0.2171	0.192	0.207	0.384
Hy2	0.00013	0.1972	1507.761	0.2430	0.2500	0.188	0.211	0.404
Hy2B	0.00013	0.1858	1457.141	0.2224	0.2350	0.165	0.209	0.386
Hy3	0.00014	0.1930	1413.919	0.2309	0.2442	0.164	0.210	0.375
Hy3B	0.00013	0.1880	1448.605	0.2262	0.2380	0.169	0.210	0.385
LUCHTKALK								
Cantillana Tradimur ®	V [m³]	m _{droog} [kg]	ρ [kg/m³]	m _{cap} [kg]	m _{eff} [kg]	f _{cap} [kg/kg]	f _{eff} [kg/kg]	f [kg/kg]
Lu1	0.00014	0.2521	1813.408	0.2571	0.2711	0.019	0.070	0.137
Lu1B	0.00013	0.2399	1801.863	0.2450	0.2586	0.021	0.072	0.140
Lu2	0.00016	0.2836	1805.449	0.2889	0.3039	0.018	0.067	0.129
Lu2B	0.00012	0.2054	1752.859	0.2123	0.2245	0.033	0.085	0.163
Lu3	0.00013	0.2612	1943.452	0.2664	0.2826	0.020	0.076	0.159
Lu3B	0.00012	0.2305	1846.955	0.2358	0.2495	0.022	0.076	0.152
CEMENT								
Cantillana Mur 8/2 ®	V [m³]	m _{droog} [kg]	ρ [kg/m³]	m _{cap} [kg]	m _{eff} [kg]	f _{cap} [kg/kg]	f _{eff} [kg/kg]	f [kg/kg]
C1	0.00013	0.1998	1499.437	0.2046	0.2154	0.023	0.072	0.117
C1B	0.00013	0.1988	1534.424	0.2054	0.2167	0.032	0.083	0.138
C2	0.00013	0.1950	1477.609	0.2002	0.2121	0.026	0.081	0.130
C2B	0.00013	0.2045	1520.898	0.2098	0.2215	0.025	0.077	0.126
C3	0.00013	0.2013	1529.635	0.2079	0.2195	0.032	0.083	0.138
C3B	0.00013	0.1947	1540.348	0.2002	0.2135	0.027	0.088	0.149

COMBINATIES								
Met hydraulische kalk	V [m ³]	m _{droog} [kg]	ρ [kg/m ³]	m _{cap} [kg]	m _{eff} [kg]	f _{cap} [kg/kg]	f _{eff} [kg/kg]	f [kg/kg]
HyC1	0.00015	0.2317	1574.049	0.2451	0.2841	0.055	0.184	0.356
HyC1B	0.00014	0.2209	1568.892	0.2647	0.2714	0.165	0.186	0.359
HyC2	0.00014	0.2178	1560.172	0.2582	0.2657	0.156	0.180	0.343
HyC2B	0.00014	0.2341	1643.961	0.2757	0.2887	0.151	0.189	0.383
HyC3	0.00015	0.2255	1487.467	0.2539	0.2798	0.112	0.194	0.358
HyC3B	0.00014	0.2132	1576.923	0.2376	0.2610	0.103	0.183	0.354
Met luchtkalk	V [m ³]	m _{droog} [kg]	ρ [kg/m ³]	m _{cap} [kg]	m _{eff} [kg]	f _{cap} [kg/kg]	f _{eff} [kg/kg]	f [kg/kg]
LuC1	0.00015	0.2666	1816.076	0.2752	0.2936	0.031	0.092	0.184
LuC1B	0.00015	0.2607	1785.616	0.2692	0.2877	0.032	0.094	0.185
LuC2	0.00015	0.2573	1752.725	0.2662	0.2833	0.033	0.092	0.177
LuC2B	0.00015	0.2641	1808.904	0.2718	0.2906	0.028	0.091	0.182
LuC3	0.00015	0.2697	1760.444	0.2805	0.2970	0.039	0.092	0.178
LuC3B	0.00014	0.2498	1769.122	0.2575	0.2756	0.030	0.094	0.183

C.2| GEMIDDELDE WATERABSORPTIECOËFFICIËNTEN

Gebaseerd op de overzichtstabel 10.7 in Bijlage B kunnen de gemiddelde waarden per morteltype berekend worden. Deze zijn weergegeven in tabel 10.12.

Tabel 10.12-A| Gemiddelde waterabsorptiecoëfficiënten proefstukken

HYDRAULISCHE KALK		
Remmers KALK ®	A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	NBN A_w [kg/m ² s ^{0.5}]
Hy1	0.4939	0.3499
Hy1B	0.5513	0.2246
Hy2	0.4634	0.4067
Hy2B	0.5256	0.3189
Hy3	0.5355	0.3421
Hy3B	0.5386	0.3305
GEMIDDELDE	0.518	0.329
STANDAARDAFWIJKING	0.033	0.059
LUCHTKALK		
Cantillana Tradimur ®	A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	NBN A_w [kg/m ² s ^{0.5}]
Lu1	0.0386	0.0361
Lu1B	0.0371	0.0336
Lu2	0.0424	0.0310
Lu2B	0.0530	0.0374
Lu3	0.0434	0.0336
Lu3B	0.0446	0.0323
GEMIDDELDE	0.043	0.034
STANDAARDAFWIJKING	0.006	0.002
CEMENT		
Cantillana Mur 8/2 ®	A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	NBN A_w [kg/m ² s ^{0.5}]
C1	0.0395	0.0284
C1B	0.0503	0.0361
C2	0.0412	0.0323
C2B	0.0408	0.0323
C3	0.0540	0.0478
C3B	0.0449	0.0323
GEMIDDELDE	0.045	0.035
STANDAARDAFWIJKING	0.006	0.007

Tabel 10.12-B| Gemiddelde waterabsorptiecoëfficiënten gecombineerde proefstukken

COMBINATIES		
Met hydraulische kalk	A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	NBN A_w [kg/m ² s ^{0.5}]
HyC1	0.1144	0.0930
HyC1B	0.4520	0.3460
HyC2	0.4196	0.4428
HyC2B	0.4449	0.5874
HyC3	0.2653	0.2969
HyC3B	0.2242	0.2427
GEMIDDELDE	0.320	0.335
STANDAARDAFWIJKING	0.140	0.170

Met luchtkalk	A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	NBN A_w [kg/m ² s ^{0.5}]
LuC1	0.1251	0.0232
LuC1B	0.1268	0.0258
LuC2	0.1342	0.0426
LuC2B	0.1181	0.0323
LuC3	0.1609	0.0426
LuC3B	0.1179	0.0413
GEMIDDELDE	0.131	0.035
STANDAARDAFWIJKING	0.016	0.009

C.3| GEMIDDELDE POROSITEITEN

Tabel 10.13-A| Gemiddelde porositeiten proefstukken

HYDRAULISCHE KALK				
Remmers KALK ®	ρ [kg/m ³]	f_{cap} [kg/kg]	f_{eff} [kg/kg]	f [kg/kg]
Hy1	1457.923	0.201	0.206	0.379
Hy1B	1470.437	0.192	0.207	0.384
Hy2	1507.761	0.188	0.211	0.404
Hy2B	1457.141	0.165	0.209	0.386
Hy3	1413.919	0.164	0.210	0.375
Hy3B	1448.605	0.169	0.210	0.385
GEMIDDELDE	1459.30	0.180	0.209	0.386
STANDAARDAFWIJKING	30.51	0.016	0.002	0.010
LUCHTKALK				
Cantillana Tradimur ®	ρ [kg/m ³]	f_{cap} [kg/kg]	f_{eff} [kg/kg]	f [kg/kg]
Lu1	1813.408	0.019	0.070	0.137
Lu1B	1801.863	0.021	0.072	0.140
Lu2	1805.449	0.018	0.067	0.129
Lu2B	1752.859	0.033	0.085	0.163
Lu3	1943.452	0.020	0.076	0.159
Lu3B	1846.955	0.022	0.076	0.152
GEMIDDELDE	1827.33	0.022	0.074	0.147
STANDAARDAFWIJKING	64.40	0.005	0.006	0.013
CEMENT				
Cantillana Mur 8/2 ®	ρ [kg/m ³]	f_{cap} [kg/kg]	f_{eff} [kg/kg]	f [kg/kg]
C1	1499.437	0.023	0.072	0.117
C1B	1534.424	0.032	0.083	0.138
C2	1477.609	0.026	0.081	0.130
C2B	1520.898	0.025	0.077	0.126
C3	1529.635	0.032	0.083	0.138
C3B	1540.348	0.027	0.088	0.149
GEMIDDELDE	1517.06	0.028	0.081	0.133
STANDAARDAFWIJKING	24.02	0.004	0.005	0.011

Tabel 10.13-B| Gemiddelde porositeiten gecombineerde proefstukken

COMBINATIES				
Met hydraulische kalk	ρ [kg/m ³]	f_{cap} [kg/kg]	f_{eff} [kg/kg]	f [kg/kg]
HyC1	1574.049	0.055	0.184	0.356
HyC1B	1568.892	0.165	0.186	0.359
HyC2	1560.172	0.156	0.180	0.343
HyC2B	1643.961	0.151	0.189	0.383
HyC3	1487.467	0.112	0.194	0.358
HyC3B	1576.923	0.103	0.183	0.354
GEMIDDELDE	1568.58	0.124	0.186	0.359
STANDAARDAFWIJKING	49.86	0.042	0.005	0.013
Met luchtkalk	ρ [kg/m ³]	f_{cap} [kg/kg]	f_{eff} [kg/kg]	f [kg/kg]
LuC1	1816.076	0.031	0.092	0.184
LuC1B	1785.616	0.032	0.094	0.185
LuC2	1752.725	0.033	0.092	0.177
LuC2B	1808.904	0.028	0.091	0.182
LuC3	1760.444	0.039	0.092	0.178
LuC3B	1769.122	0.030	0.094	0.183
GEMIDDELDE	1782.15	0.032	0.092	0.181
STANDAARDAFWIJKING	26.02	0.004	0.001	0.003

|BIJLAGE D: MASSABALANSEN DELPHIN

D.1| VOCHTMASSABALANS

| AANNAMES

- Geen vorming van ijs.
- Een verdampingsevenwicht (Kelvin – vergelijking)
- De massaflux van het diffusieve vloeibare water en de spreiding van het vloeibare water en waterdamp is verwaarloosbaar.
- Een aanwezig dampdrukevenwicht tussen alle fases.
- Vervormingen van het vast materiaal zijn verwaarloosbaar.

| VOCHTMASSABALANS

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{REV}^{m_{v+w}}) = \frac{\partial}{\partial x}(j_{conv}^{m_w} + j_{conv}^{m_v} + j_{diff}^{m_v}) + \sigma_{REV}^{m_{v+w}} \quad (10.1)$$

Waarbij

- $\rho_{REV}^{m_{v+w}}$ de massadichtheid van het vocht (vloeibaar en waterdamp) in het referentievolumen [kg/m³],
 $j_{conv}^{m_w}$ de massaflux voor convectief transport van vloeibaar capillair water [kg/m²s],
 $j_{conv}^{m_v}$ de massaflux voor convectief transport van waterdamp [kg/m²s],
 $j_{diff}^{m_v}$ de massaflux voor diffusief transport van waterdamp [kg/m²s],
 $\sigma_{REV}^{m_{v+w}}$ de productie of afvoer van vocht (vloeibaar en waterdamp) in het referentievolumen [kg/m³s].

| UITWERKING MASSABALANS

CONVECTIEF TRANSPORT VAN VLOEIBAAR CAPILLAIR WATER

$$j_{conv}^{m_w} = C_l^{m_w} \cdot j_{conv}^{m_l} \quad (10.2-A)$$

Waarbij

$$j_{conv}^{m_l} = -K_l \left(\frac{\partial p_l}{\partial x} + \rho_l \cdot g \right) \quad (10.2-B)$$

$$C_l^{m_w} = 1 - C_l^{m_{voc}} \quad (10.2-C)$$

en

- $j_{conv}^{m_w}$ de massaflux voor convectief transport van vloeibaar capillair water [kg/m²s],
 $C_l^{m_w}$ de massaconcentratie van het vloeibaar water [kg/kg],
 $j_{conv}^{m_l}$ de massaflux voor convectief transport van de vloeibare fase [kg/m²s],
 K_l de conductiviteitscoëfficiënt van het vloeibaar water [s],
 p_l de druk van het vloeibaar water [Pa],
 ρ_l de intrinsieke dichtheid van de vloeibare fase [kg/m³],
 g de gravitatieconstante [m/s²],
 $C_l^{m_{voc}}$ de massaconcentratie aan VOC [kg/kg].

Bij de massaflux voor het convectief transport van vloeibaar capillair water wordt ook het VOC-transport in rekening gebracht. Wanneer er geen VOC-transport optreedt, wordt de massaconcentratie van het vloeibaar water 1kg/kg. Wanneer er wel transport aan VOC zou optreden, dan wordt de massaconcentratie van het vloeibaar water bepaald volgens formule (10.2-C). Er dient daarnaast te worden opgemerkt dat Delphin een verschil aanneemt tussen de vloeibare fase en het pure vloeibare water.

CONVECTIEF TRANSPORT VAN WATERDAMP

$$j_{conv}^{m_v} = C_g^{m_v} \cdot j_{conv}^{m_g} \quad (10.2-D)$$

Waarbij

$$j_{conv}^{m_g} = -K_g \left(\frac{\partial p_g}{\partial x} + \rho_g \cdot g \right) \quad (10.2-E)$$

$$C_g^{m_v} = \frac{p_v}{p_a + p_v} \cdot \frac{R_a}{R_v} \quad (10.2-F)$$

en

$j_{conv}^{m_v}$ de massaflux voor convectief transport van waterdamp [kg/m²s],

$C_g^{m_v}$ de massaconcentratie van de waterdamp [kg/kg],

$j_{conv}^{m_g}$ de massaflux voor convectief transport van de gasfase [kg/m²s],

K_g de conductiviteitscoëfficiënt van de gasfase [s],

p_g de gasdruk [Pa],

ρ_g de intrinsieke dichtheid van de gasfase [kg/m³],

g de gravitatieconstante [m/s²],

p_v de waterdampdruk in de gasfase [Pa],

p_a de luchtdruk in de gasfase [Pa],

R_a de gasconstante van lucht [J/kgK],

R_v de gasconstante van waterdamp [J/kgK].

DIFFUSIEF TRANSPORT VAN WATERDAMP

$$j_{diff}^{m_v} = - \frac{D_{v,air}(T)}{\mu \cdot R_v \cdot T} \cdot f(\theta_g) \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (10.2-G)$$

Waarbij

$$\theta_g = \theta_{por} - \theta_l \quad (10.2-H)$$

en

$j_{diff}^{m_v}$ de massaflux voor diffusief transport van waterdamp [kg/m²s],

$D_{v,air}(T)$ de waterdampdiffusie in vrije lucht volgens Schirmer [m²/s],

μ het diffusieweerstandsgetal [-],

R_v de gasconstante van waterdamp [J/kgK],

T de temperatuur [K],

$f(\theta_g)$ de functie van volumefractie van de gasfase [m³/m³],

p_v de waterdampdruk in de gasfase [Pa],

θ_g de volumefractie van de gasfase [m³/m³],

θ_{por} de porositeit van het materiaal [m³/m³],

θ_l de volumefractie van de vloeibare fase [m³/m³].

D.2| LUCHTMASSABALANS

| AANNAMES

- Droge lucht bestaat uit O₂, N₂, en enkele andere minder belangrijke componenten, met uitzondering van VOC en H₂O (in de vorm van waterdamp).
- Gasvormige lucht bestaat uit droge lucht, waterdamp en VOC.
- De massaflux van het convectief transport van de gasvormige lucht wordt apart van warmte-, vocht- en VOC-transport beschouwd. Bijgevolg hebben het warmte-, vocht- en VOC-transport, buiten het drijfvermogen, geen effect op de massaflux van de lucht.
- Enkel laminair gas wordt beschouwd.
- De kinetische energie van de bewegende fases is verwaarloosbaar.
- De gasconstante van droge lucht kan gebruikt worden voor vochtige lucht.

| LUCHTMASSABALANS

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{REV}^{m_a}) = \frac{\partial}{\partial x}(j_{conv}^{m_a}) + \sigma_{REV}^{m_a} \quad (10.3-A)$$

Waarbij

$\rho_{REV}^{m_a}$ de massadichtheid van de lucht in het referentievolumen [kg/m³],
 $j_{conv}^{m_a}$ de massaflux voor convectief transport van de lucht [kg/m²s],
 $\sigma_{REV}^{m_a}$ de productie of afvoer van lucht in het referentievolumen [kg/m³s].

| UITWERKING MASSABALANS

CONVECTIEF TRANSPORT VAN LUCHT

$$j_{conv}^{m_a} = C_g^{m_a} \cdot j_{conv}^{m_g} \quad (10.3-B)$$

Waarbij

$$j_{conv}^{m_g} = -K_g \left(\frac{\partial p_g}{\partial x} + \rho_g \cdot g \right) \quad \text{volgens formule (10.2-D)}$$

$$C_g^{m_a} = \frac{p_a}{p_a + p_v} \cdot \frac{R_v}{R_a} \quad (10.3-C)$$

en

$j_{conv}^{m_a}$ de massaflux voor convectief transport van de lucht [kg/m²s],
 $C_l^{m_a}$ de massaconcentratie aan lucht in de gasfase [kg/kg],
 $j_{conv}^{m_g}$ de massaflux voor convectief transport van de gasfase [kg/m²s],
 K_g de conductiviteitscoëfficiënt van de gasfase [s],
 p_g de gasdruk [Pa],
 ρ_g de intrinsieke dichtheid van de gasfase [kg/m³],
 g de gravitatieconstante [m/s²],
 p_a de luchtdruk in de gasfase [Pa],
 p_v de waterdampdruk in de gasfase [Pa],
 R_v de gasconstante van waterdamp [J/kgK],
 R_a de gasconstante van lucht [J/kgK].

D.3| VOC-MASSABALANS

| VOC-MASSABALANS

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{REV}^{m_{VOC,l+g}}) = \frac{\partial}{\partial x}(j_{conv}^{m_{VOC,g}} + j_{diff}^{m_{VOC,g}} + j_{conv}^{m_{VOC,l}}) + \sigma_{REV}^{m_{VOC,l+g}} \quad (10.4-A)$$

Waarbij

$\rho_{REV}^{m_{VOC,l+g}}$ de massadichtheid van VOC (vloeibaar en gasvormig) in het referentievolumen [kg/m³],
 $j_{conv}^{m_{VOC,g}}$ de massaflux voor convectief transport van gasvormig VOC [kg/m²s],
 $j_{diff}^{m_{VOC,g}}$ de massaflux voor diffusief transport van gasvormig VOC [kg/m²s],
 $j_{conv}^{m_{VOC,l}}$ de massaflux voor convectief transport van opgelost of geabsorbeerd VOC [kg/m²s],
 $\sigma_{REV}^{m_{VOC,l+g}}$ de productie of afvoer van VOC in het referentievolumen [kg/m³s].

| UITWERKING MASSABALANS

CONVECTIEF TRANSPORT VAN VOC IN GASFASE

$$j_{conv}^{m_{VOC,g}} = C_g^{m_{VOC}} \cdot j_{conv}^{m_g} \quad (10.4-B)$$

Waarbij

$$j_{conv}^{m_g} = -K_g \left(\frac{\partial p_g}{\partial x} + \rho_g \cdot g \right) \quad \text{volgens formule (10.2-D)}$$

$$C_g^{mVOC} = \frac{\rho_g^{mVOC}}{\rho_g} \quad (10.4-C)$$

en

- $j_{conv}^{mVOC,g}$ de massaflux voor convectief transport van gasvormig VOC [kg/m²s],
 C_g^{mVOC} de massaconcentratie van VOC in de gasfase [kg/kg],
 $j_{conv}^{m_g}$ de massaflux voor convectief transport van de gasfase [kg/m²s],
 K_g de conductiviteitscoëfficiënt van de gasfase [s],
 p_g de gasdruk [Pa],
 ρ_g de intrinsieke dichtheid van de gasfase [kg/m³],
 g de gravitatieconstante [m/s²],
 ρ_g^{mVOC} de intrinsieke dichtheid van VOC in de gasfase [kg/m³],
 ρ_g de intrinsieke dichtheid van de gasfase [kg/m³].

CONVECTIEF TRANSPORT VAN VOC IN DE VLOEIBARE FASE (OPGELOST OF GEABSORBEERD)

$$j_{conv}^{mVOC,l} = C_l^{mVOC} \cdot j_{conv}^{m_l} \quad (10.4-D)$$

Waarbij

$$j_{conv}^{m_l} = -K_l \left(\frac{\partial p_l}{\partial x} + \rho_l \cdot g \right) \quad \text{volgens formule (10.2-B)}$$

$$C_l^{mVOC} = \frac{\rho_l^{mVOC}}{\rho_l} \quad (10.4-E)$$

en

- $j_{conv}^{mVOC,l}$ de massaflux voor convectief transport van opgelost of geabsorbeerd VOC [kg/m²s],
 C_l^{mVOC} de massaconcentratie van VOC in de vloeibare fase [kg/kg],
 $j_{conv}^{m_l}$ de massaflux voor convectief transport van de vloeibare fase [kg/m²s],
 K_l de conductiviteitscoëfficiënt van het vloeibaar water [s],
 p_l de druk van het vloeibaar water [Pa],
 ρ_l de intrinsieke dichtheid van de vloeibare fase [kg/m³],
 g de gravitatieconstante [m/s²],
 ρ_l^{mVOC} de intrinsieke dichtheid van VOC in de vloeibare fase [kg/m³],
 ρ_l de intrinsieke dichtheid van de vloeibare fase [kg/m³].

DIFFUSIEF TRANSPORT VAN VOC IN DE GASFASE

$$j_{diff}^{mVOC,g} = - \frac{D_{VOC}^{air}(T)}{\mu_{VOC} \cdot R_{VOC} \cdot T} \cdot f(\theta_g) \cdot \frac{\partial p_{VOC}}{\partial x} \quad (10.4-F)$$

Waarbij

$$\theta_g = \theta_{por} - \theta_l \quad \text{volgens formule (10.2-H)}$$

en

- $j_{diff}^{mVOC,g}$ de massaflux voor diffusief transport van gasvormig VOC [kg/m²s],
 $D_{VOC}^{air}(T)$ de diffusie van VOC in vrije lucht [m²/s],
 μ_{VOC} het VOC-diffusieweerstandsgetal[-],
 R_{VOC} de specifieke gasconstante van VOC[J/kgK],
 T de temperatuur [K],
 $f(\theta_g)$ de functie van volumefractie van de gasfase [m³/m³],
 p_{VOC} de druk van VOC in de gasfase [Pa],
 θ_g de volumefractie van de gasfase [m³/m³],
 θ_{por} de porositeit van het materiaal [m³/m³],
 θ_l de volumefractie van de vloeibare fase [m³/m³].

D.4| INWENDIGE ENERGIEBALANS

| AANNAMES

- Een temperatuur evenwicht tussen alle fases
- Het verschil tussen de inwendige energie U en enthalpie H is verwaarloosbaar.

| INWENDIGE ENERGIEBALANS

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{REV}^U) = \frac{\partial}{\partial x}(j_{conv}^U + j_{diff}^U) + \sigma_{REV}^U \quad (10.5-A)$$

Waarbij

ρ_{REV}^U de massadichtheid van de inwendige energie van het referentievolumen [J/m³],
 j_{conv}^U de massaflux voor convectief warmtetransport van de inwendige energie [W/m²],
 j_{diff}^U de massaflux voor diffusief warmtetransport van de inwendige energie [W/m²],
 σ_{REV}^U de productie of afvoer van energie in het referentievolumen [W/m³].

| UITWERKING MASSABALANS

CONVECTIEF TRANSPORT VAN INWENDIGE ENERGIE

$$j_{conv}^U = u_g \cdot j_{conv}^{m_g} + u_l \cdot j_{conv}^{m_l} \quad (10.5-B)$$

Waarbij

$$j_{conv}^{m_g} = -K_g \left(\frac{\partial p_g}{\partial x} + \rho_g \cdot g \right) \quad \text{volgens formule (10.2-D)}$$

$$j_{conv}^{m_l} = -K_l \left(\frac{\partial p_l}{\partial x} + \rho_l \cdot g \right) \quad \text{volgens formule (10.2-B)}$$

en

j_{conv}^U , de massaflux voor convectief warmtetransport van de inwendige energie [W/m²],

u_g , de specifieke inwendige energie van de gasfase [J/kg],

$j_{conv}^{m_g}$, de massaflux voor convectief transport van de gasfase [kg/m²s],

u_l , de specifieke inwendige energie van de vloeibare fase [J/kg],

$j_{conv}^{m_l}$, de massaflux voor convectief transport van de vloeibare fase [kg/m²s],

K_g , de conductiviteitscoëfficiënt van de gasfase [s],

p_g , de gasdruk [Pa],

ρ_g , de intrinsieke dichtheid van de gasfase [kg/m³],

g , de gravitatieconstante [m/s²],

K_l , de conductiviteitscoëfficiënt van het vloeibaar water [s],

p_l , de druk van het vloeibaar water [Pa],

ρ_l , de intrinsieke dichtheid van de vloeibare fase [kg/m³].

| DIFFUSIEF TRANSPORT VAN INWENDIGE ENERGIE

$$j_{diff}^U = j_{diff}^Q + h_v \cdot j_{diff}^{m_v} + h_{VOC,g} \cdot j_{diff}^{m_{VOC,g}} \quad (10.5-C)$$

Waarbij

$$j_{diff}^Q = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (10.5-D)$$

$$j_{diff}^{m_v} = -\frac{D_{v,air}(T)}{\mu \cdot R_v \cdot T} \cdot f(\theta_g) \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (10.2-G)$$

$$j_{diff}^{m_{VOC,g}} = -\frac{D_{VOC}^{air}(T)}{\mu_{VOC} \cdot R_{VOC} \cdot T} \cdot f(\theta_g) \cdot \frac{\partial p_{VOC}}{\partial x} \quad \text{volgens formule (10.4-F)}$$

$$\theta_g = \theta_{por} - \theta_l \quad \text{volgens formule (10.2-H)}$$

en

j_{diff}^U de massaflux voor diffusief warmtetransport van de inwendige energie [W/m²],

j_{diff}^Q de massaflux voor warmtegeleiding [W/m²],

h_v de specifieke verdampingsenthalpie van waterdamp [J/kg],

$j_{diff}^{m_v}$ de massaflux voor diffusief transport van waterdamp [kg/m²s],

$h_{VOC,g}$ de specifieke enthalpie van gasvormige VOC [J/kg],

$j_{diff}^{m_{VOC,g}}$ de massaflux voor diffusief transport van gasvormig VOC [kg/m²s],

λ de warmtegeleidingscoëfficiënt van het materiaal [W/mK],

T de temperatuur [K],

$D_{v,air}(T)$ de waterdampdiffusie in vrije lucht volgens Schirmer [m²/s],

μ het diffusieweerstandsgetal[-],

R_v de gasconstante van waterdamp [J/kgK],

$f(\theta_g)$ de functie van volumefractie van de gasfase [m³/m³],

p_v de waterdampdruk in de gasfase [Pa],

$D_{VOC}^{air}(T)$ de diffusie van VOC in vrije lucht [m²/s],

μ_{VOC} het VOC-diffusieweerstandsgetal[-],

R_{VOC} de specifieke gasconstante van VOC [J/kgK],

p_{VOC} de druk van VOC in de gasfase [Pa],

θ_g de volumefractie van de gasfase [m³/m³],

θ_{por} de porositeit van het materiaal [m³/m³],

θ_l de volumefractie van de vloeibare fase [m³/m³].

BIJLAGE E: RESULTATEN DELPHIN

E.1 | REFERENTIE MODELLEN

| TEMPERATUUR

Voor de verschillende proefstukken werd de temperatuur over het gehele proefstuk uitgezet in functie van de tijd.

Figuren 10.20 geven het temperatuursverloop over de verschillende proefstukken weer.

Figuren 10.21 geven het temperatuursverloop over de verschillende gecombineerde proefstukken weer.

Figuren 10.22 geven het temperatuursverloop over een gecombineerd proefstuk (hydraulische kalk) weer voor verschillende grensweerstand tussen beide mortels.

| VOCHTGEHALTE

Voor de verschillende proefstukken werd ook het vochtgehalte over het gehele proefstuk uitgezet in functie van de tijd.

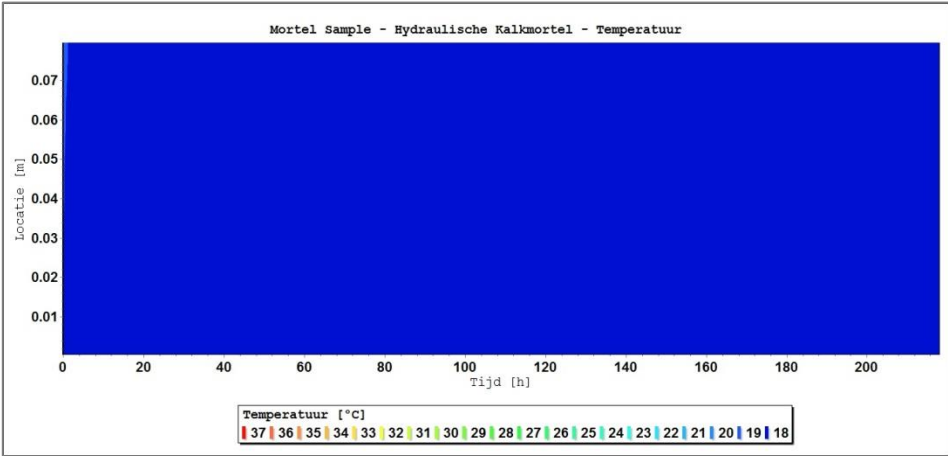
Figuren 10.23 geven het vochtgehalte over de verschillende proefstukken weer.

Figuren 10.24 geven het vochtgehalte over een gecombineerd proefstuk (hydraulische kalk) weer voor verschillende grensweerstand tussen beide mortels.

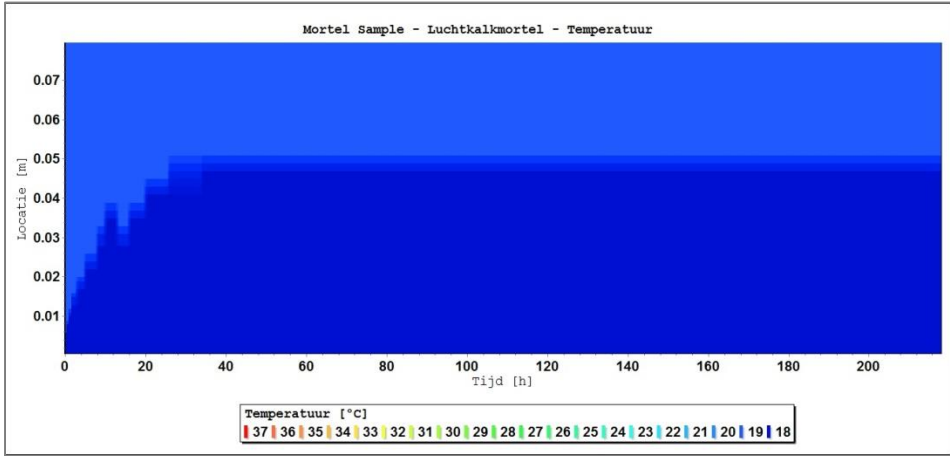
Figuren 10.25 geven het vochtgehalte over een gecombineerd proefstuk (luchtkalk) weer voor verschillende grensweerstand tussen beide mortels.

Figuren 10.26 geven het vochtgehalte over een gecombineerd proefstuk (historische kalk) weer voor verschillende grensweerstand tussen beide mortels.

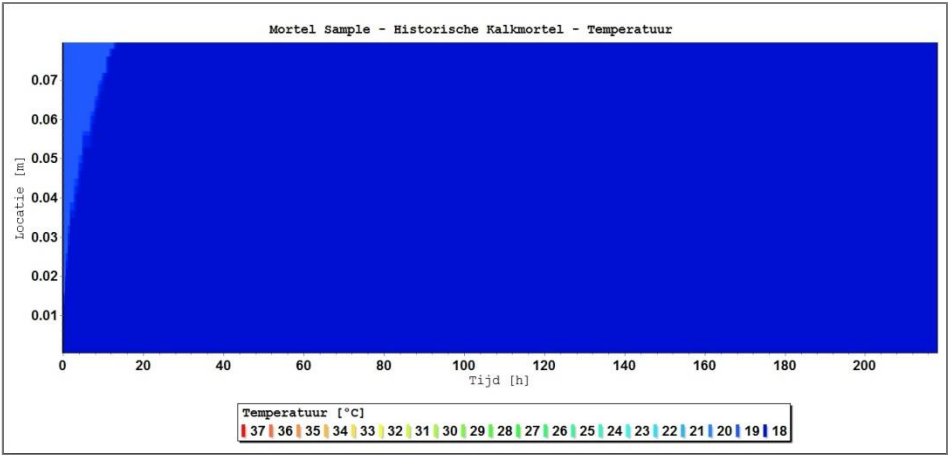
TEMPERATUUR PROEFSTUKKEN



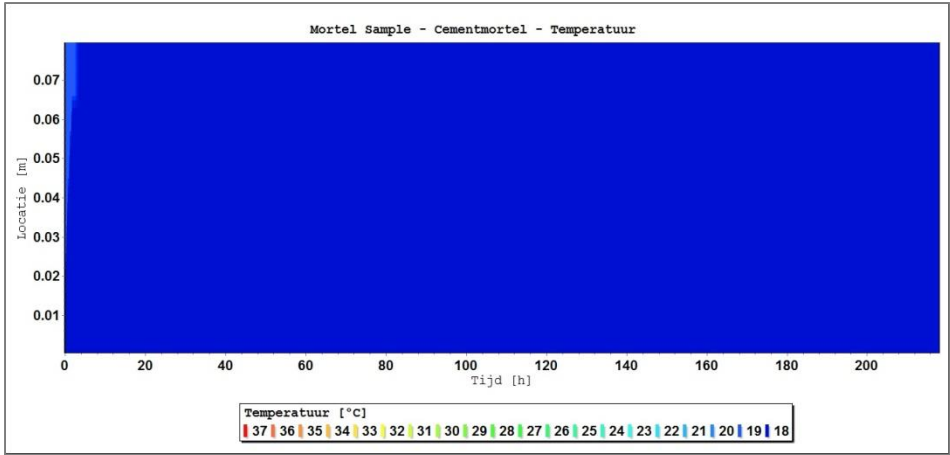
Figuur 10.20-A| Proefstuk – Hydraulische Kalkmortel - Temperatuur



Figuur 10.20-B| Proefstuk – Luchtkalkmortel - Temperatuur

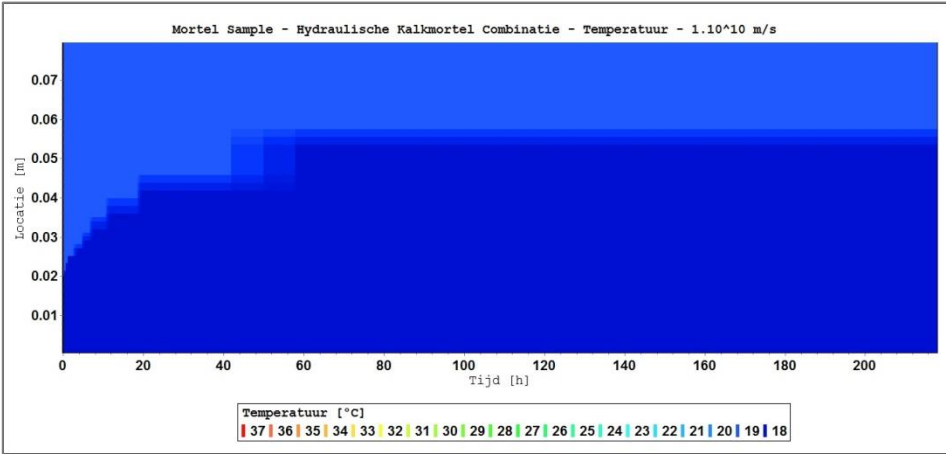


Figuur 10.20-C| Proefstuk – Historische Kalkmortel – Temperatuur

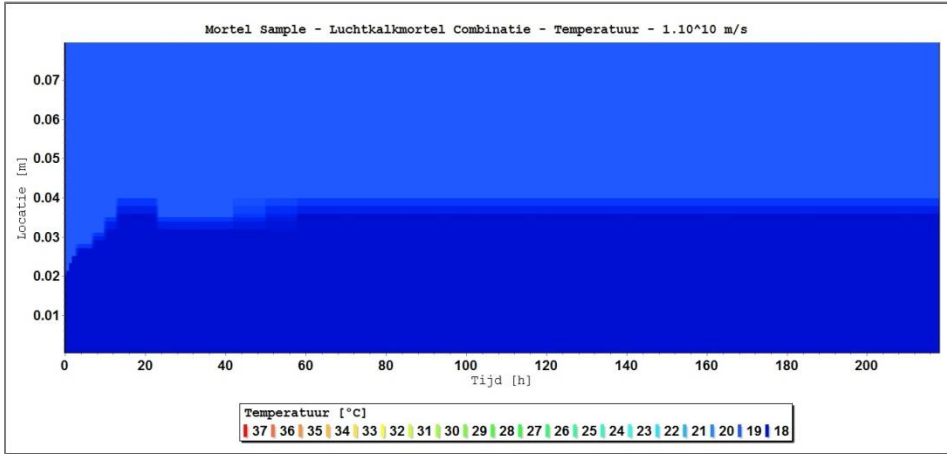


Figuur 10.20-D| Proefstuk – Cementmortel - Temperatuur

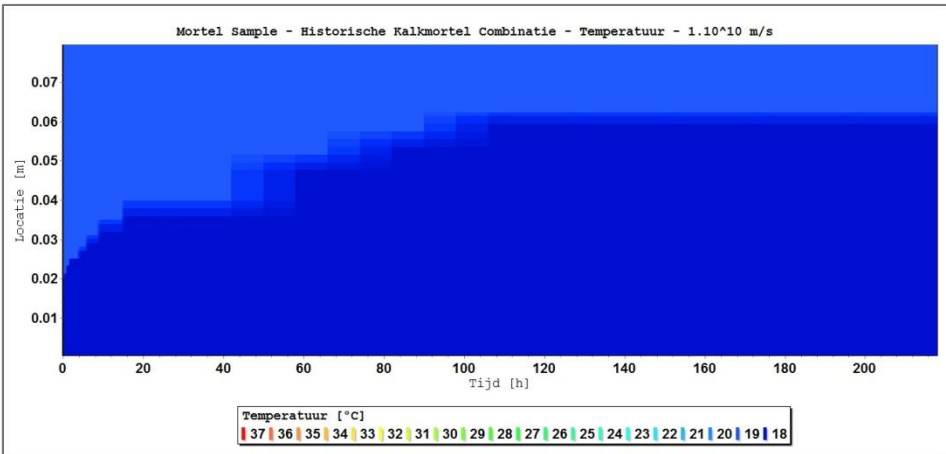
TEMPERATUUR GECOMBINEERDE PROEFSTUKKEN



Figuur 10.21-A| Proefstuk – Hydraulische Kalkmortel Comb. - Temperatuur

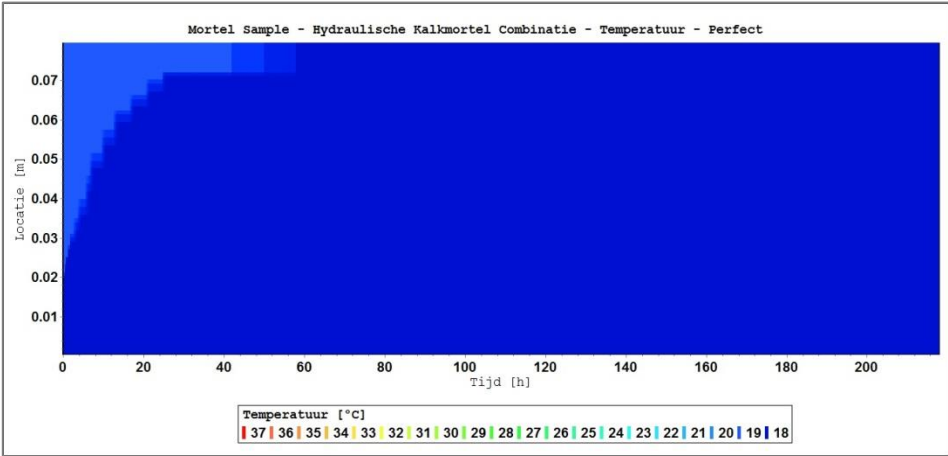


Figuur 10.21-B| Proefstuk – Luchtkalkmortel Comb.- Temperatuur

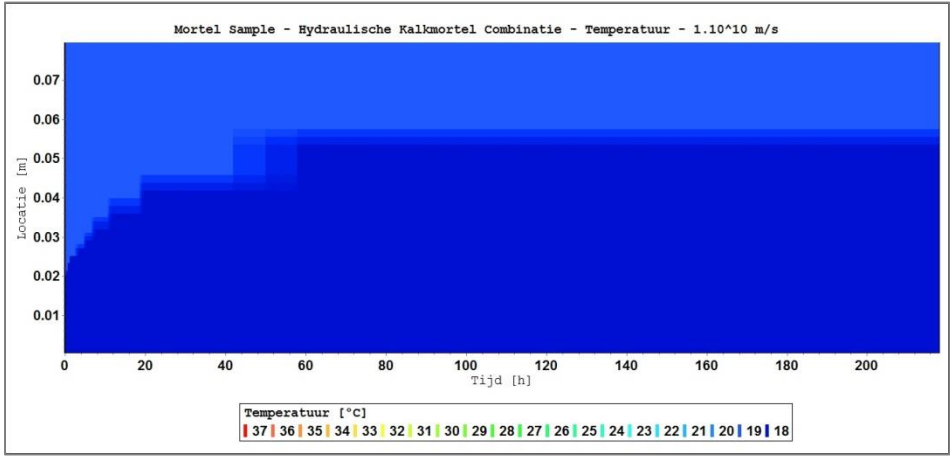


Figuur 10.21-C| Proefstuk – Historische Kalkmortel Comb. – Temperatuur

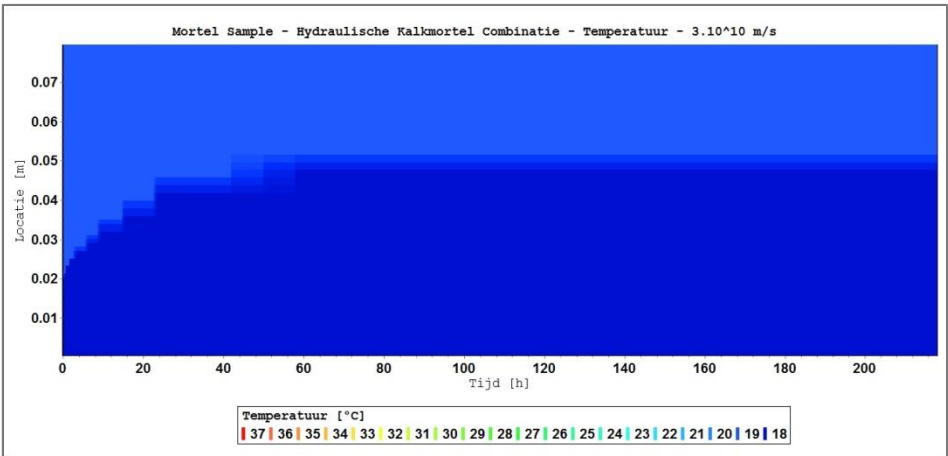
TEMPERATUUR COMBINATIESTUK HYDRAULISCHE KALKMORTEL



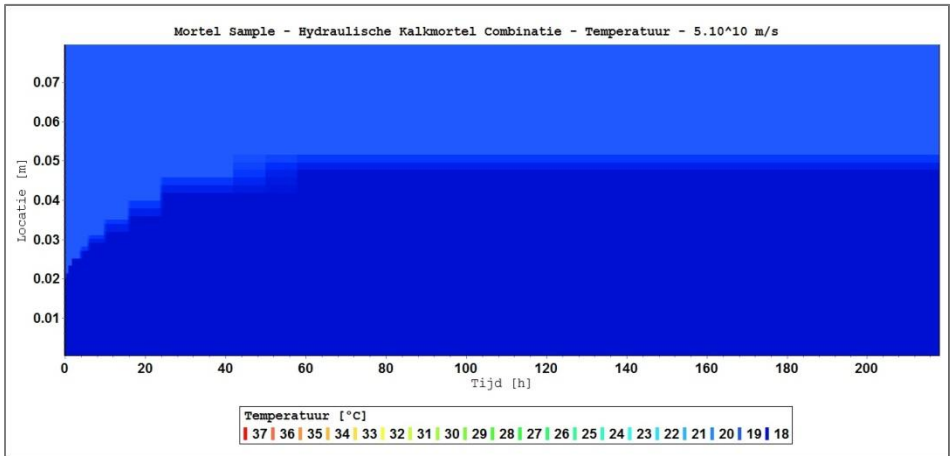
Figuur 10.22-A| Proefstuk – Hydraulische Kalkmortel Comb. - Temperatuur - Perfect



Figuur 10.22-B| Proefstuk – Hydraulische Kalkmortel Comb.- Temperatuur – 1.10¹⁰ m/s

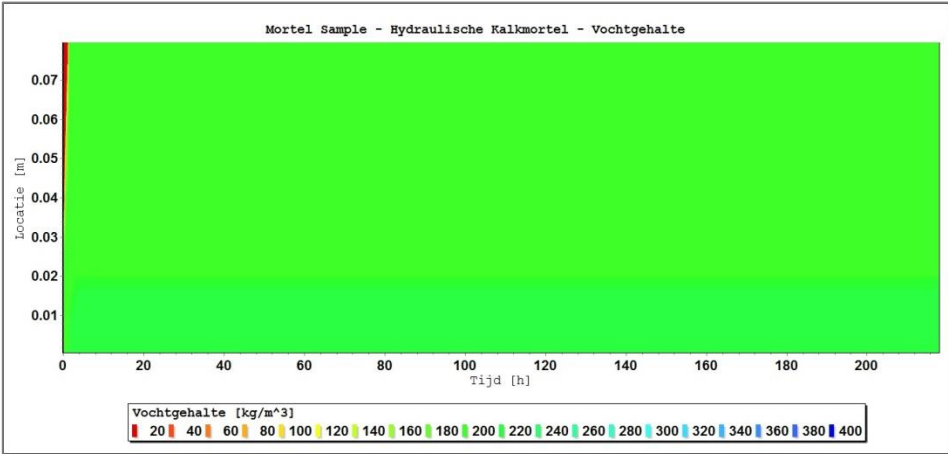


Figuur 10.22-C| Proefstuk – Hydraulische Kalkmortel Comb. - Temperatuur – 3.10¹⁰ m/s

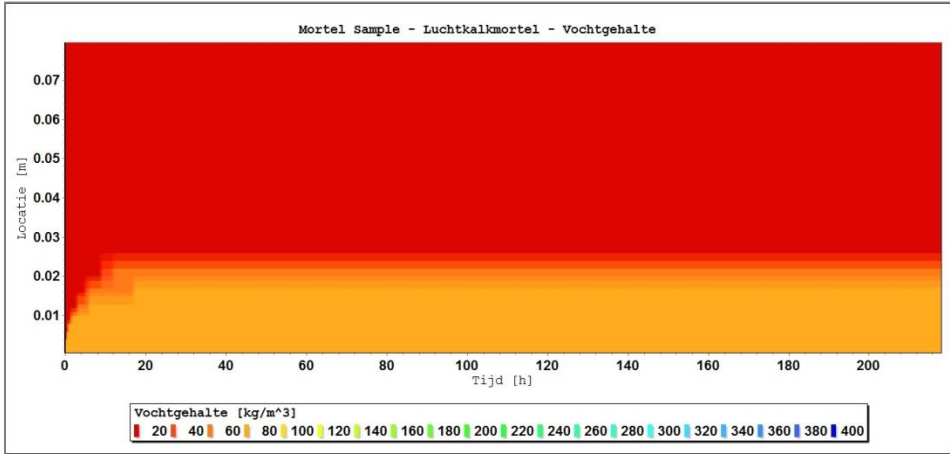


Figuur 10.22-D| Proefstuk – Hydraulische Kalkmortel Comb.- Temperatuur – 5.10¹⁰ m/s

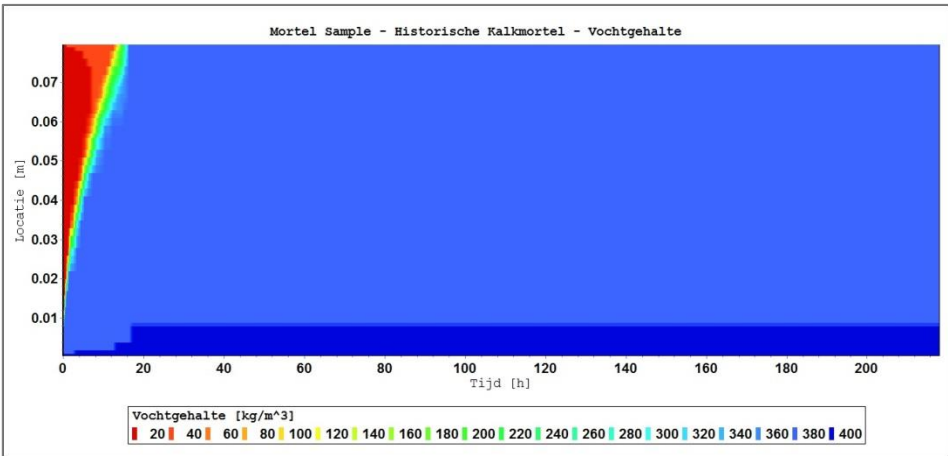
VOCHTGEHALTE PROEFSTUKKEN



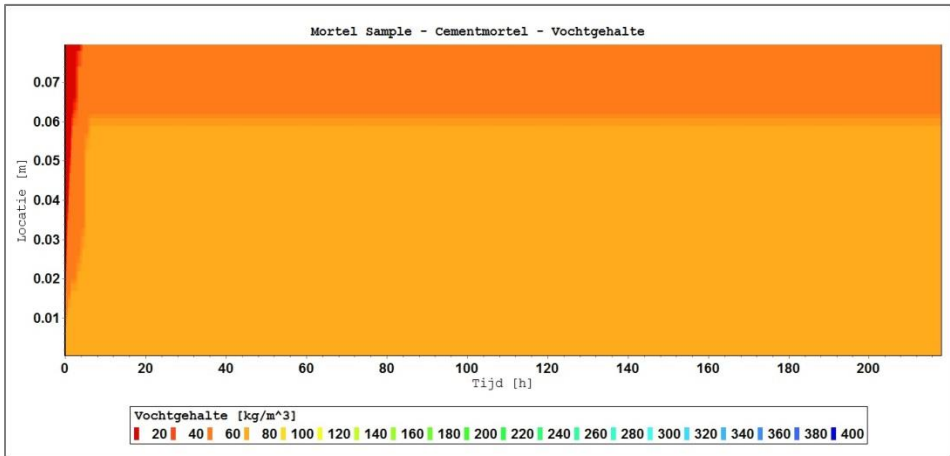
Figuur 10.23-A| Proefstuk – Hydraulische Kalkmortel - Vochtgehalte



Figuur 10.23-B| Proefstuk – Luchtkalkmortel - Vochtgehalte

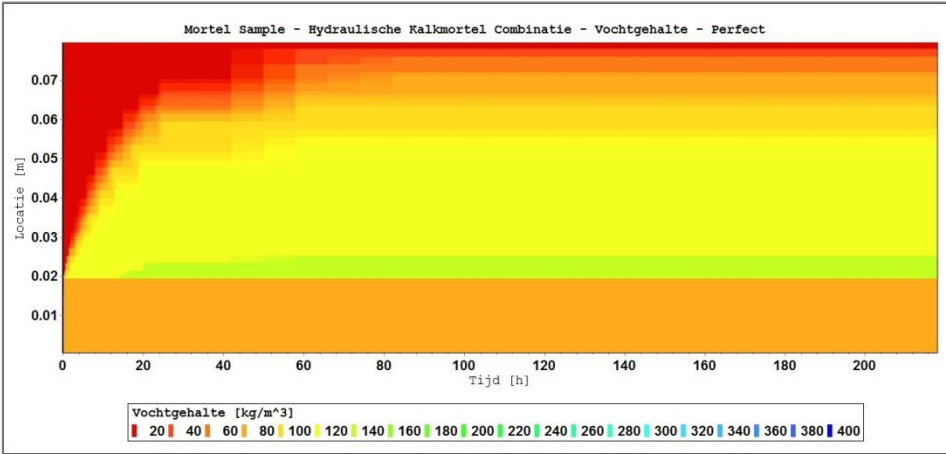


Figuur 10.23-C| Proefstuk – Historische Kalkmortel – Vochtgehalte

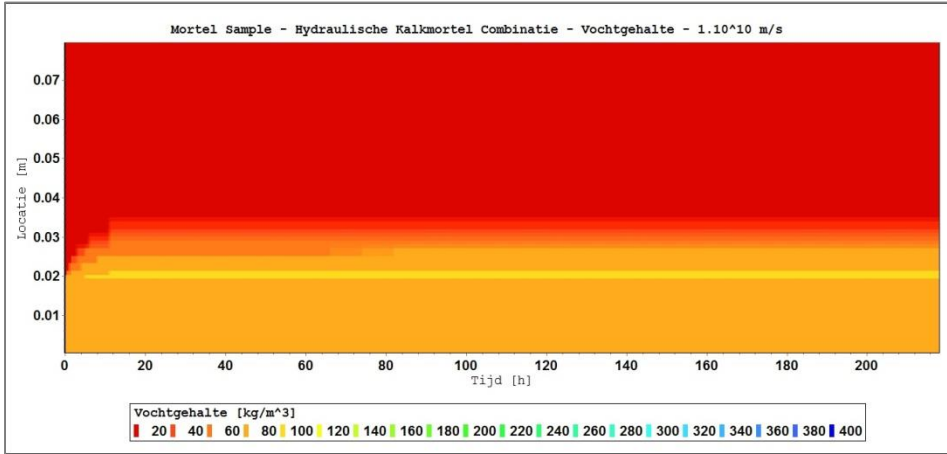


Figuur 10.23-D| Proefstuk – Cementmortel - Vochtgehalte

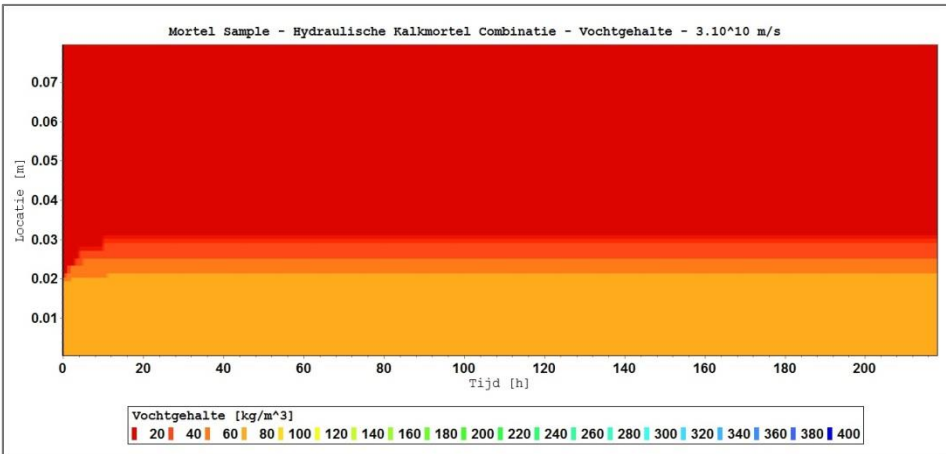
VOCHTGEHALTE COMBINATIESTUK HYDRAULISCHE KALKMORTEL



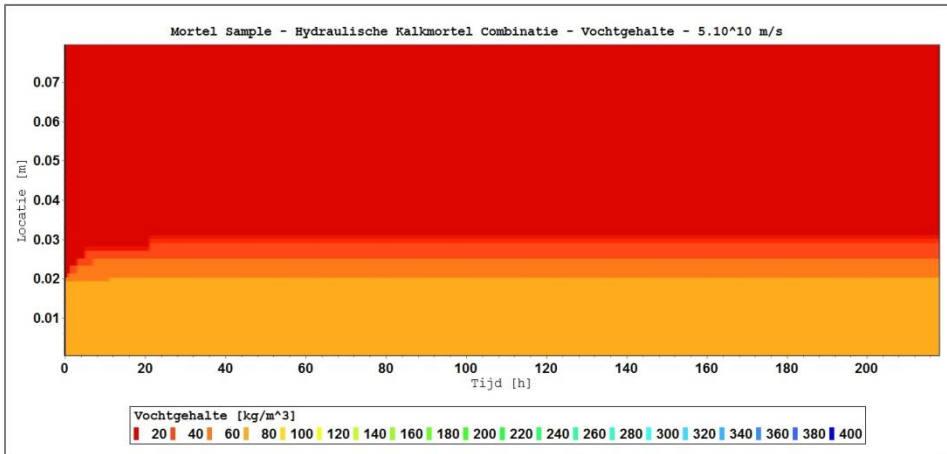
Figuur 10.24-A| Proefstuk – Hydraulische Kalkmortel Comb. - Vochtgehalte - Perfect



Figuur 10.24-B| Proefstuk – Hydraulische Kalkmortel Comb.- Vochtgehalte – 1.10¹⁰ m/s

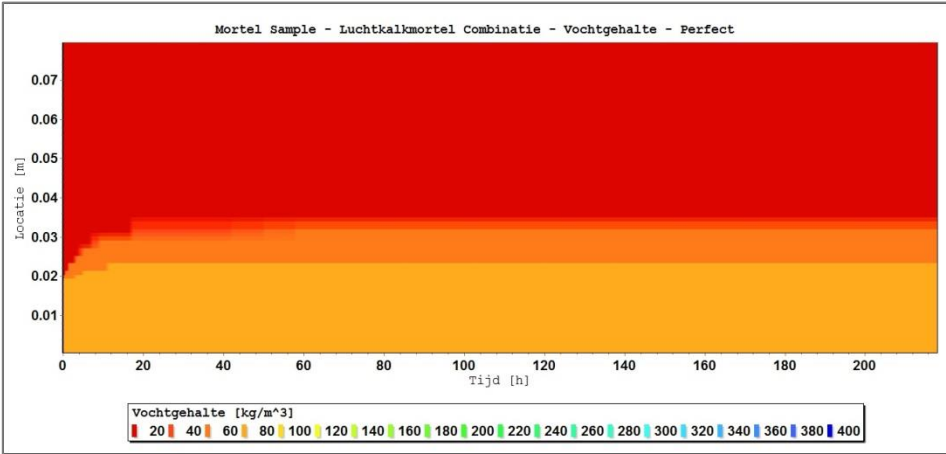


Figuur 10.24-C| Proefstuk – Hydraulische Kalkmortel Comb.- Vochtgehalte – 3.10¹⁰ m/s

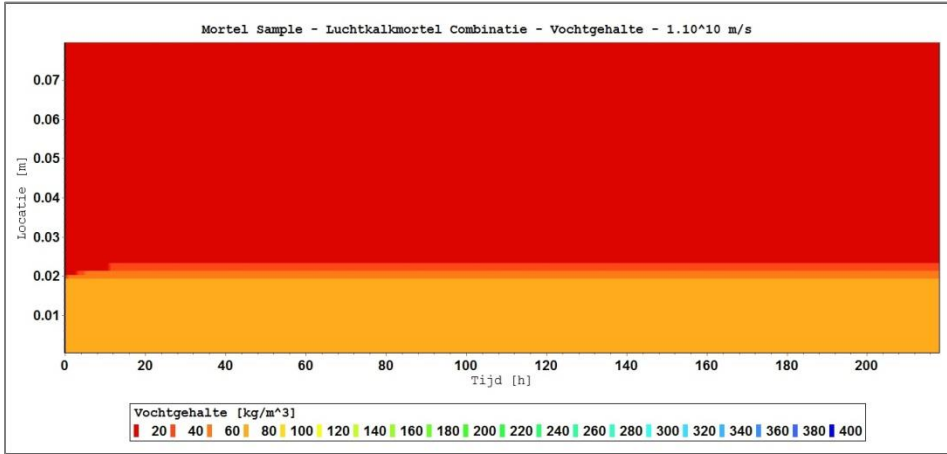


Figuur 10.24-D| Proefstuk – Hydraulische Kalkmortel Comb.- Vochtgehalte – 5.10¹⁰ m/s

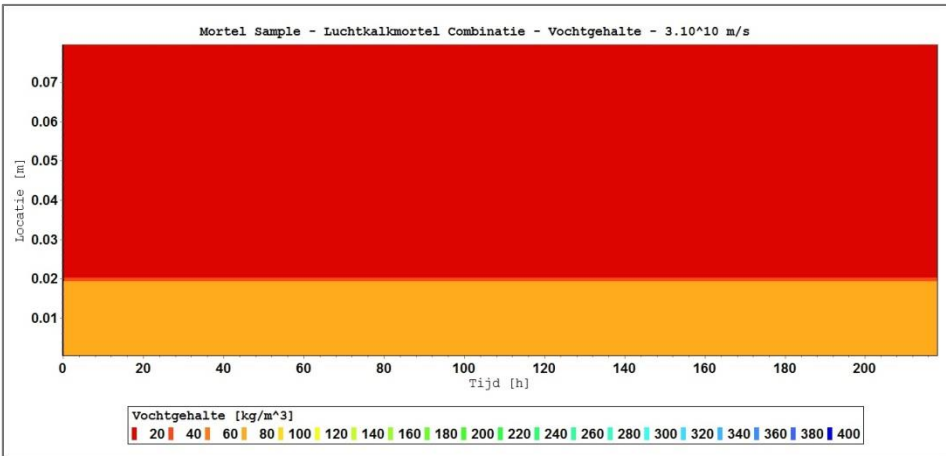
VOCHTGEHALTE COMBINATIESTUK LUCHTKALKMORTEL



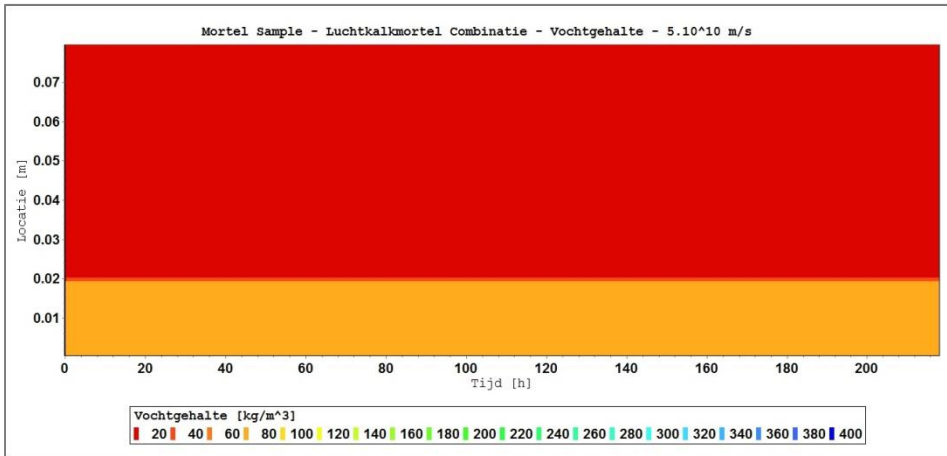
Figuur 10.25-A| Proefstuk – Luchtkalkmortel Comb.- Vochtgehalte - Perfect



Figuur 10.25-B| Proefstuk – Luchtkalkmortel Comb.- Vochtgehalte – 1.10¹⁰ m/s

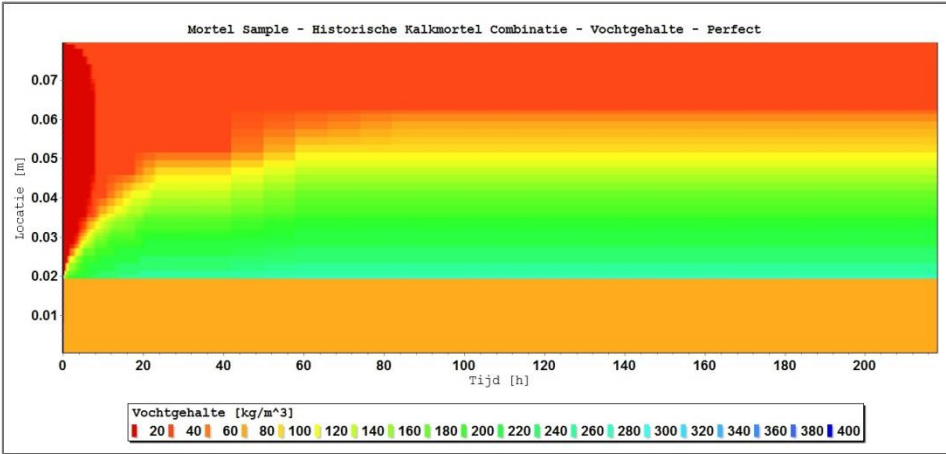


Figuur 10.25-C| Proefstuk – Luchtkalkmortel Comb.- Vochtgehalte – 3.10¹⁰ m/s

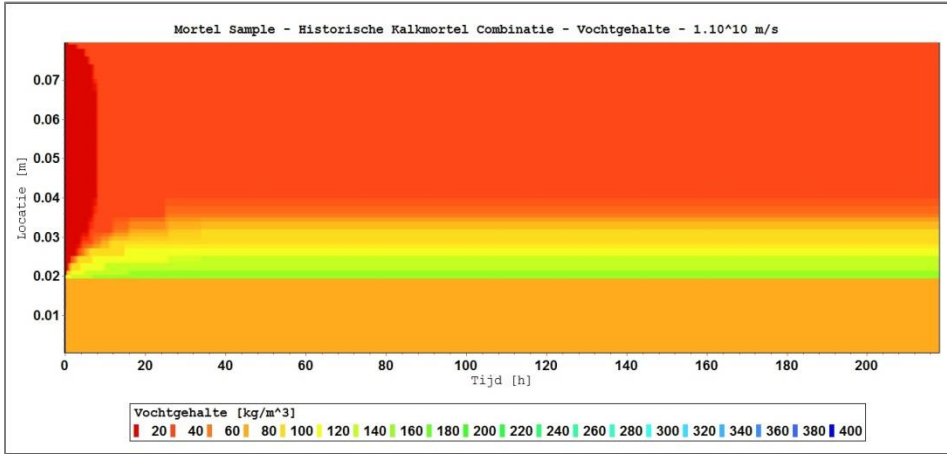


Figuur 10.25-D| Proefstuk – Luchtkalkmortel Comb.- Vochtgehalte – 5.10¹⁰ m/s

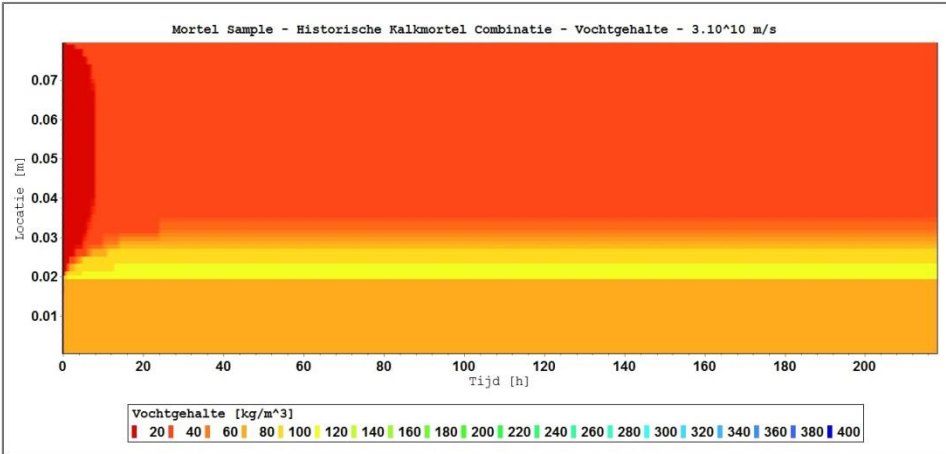
VOCHTGEHALTE COMBINATIESTUK HISTORISCHE KALKMORTEL



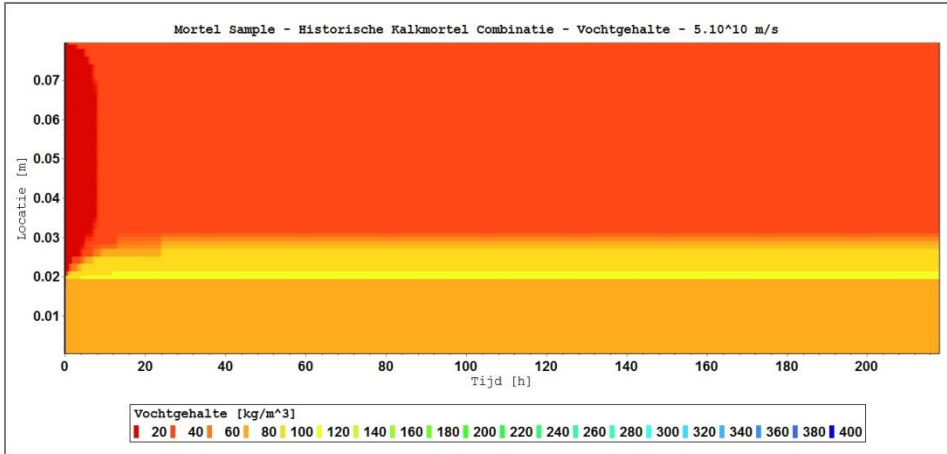
Figuur 10.26-A| Proefstuk – Historische Kalkmortel Comb.- Vochtgehalte - Perfect



Figuur 10.26-B| Proefstuk – Historische Kalkmortel Comb.- Vochtgehalte – 1.10^{-10} m/s



Figuur 10.26-C| Proefstuk – Historische Kalkmortel Comb.- Vochtgehalte – 3.10^{-10} m/s



Figuur 10.26-D| Proefstuk – Historische Kalkmortel Comb.- Vochtgehalte – 5.10^{-10} m/s

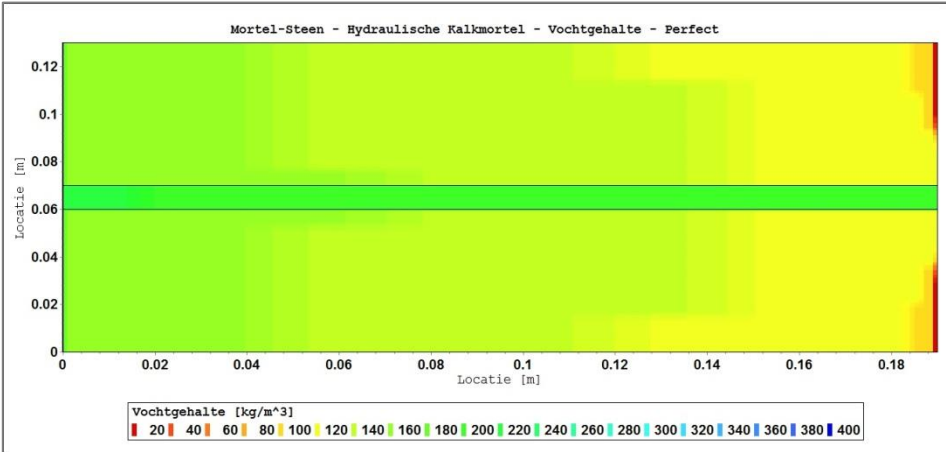
E.2| COMPOSITIE MODELLEN

| VOCHTGEHALTE

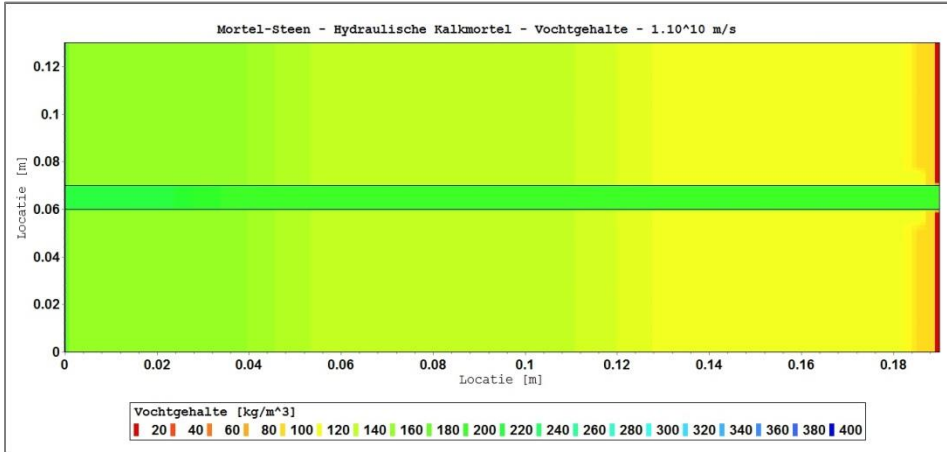
Wegens de beknoptheid van deze thesis werd er geopteerd om enkel de simulaties van de hydraulische kalkmortel, zowel puur als gecombineerd, volledig weer te geven. Eenzelfde conclusies kunnen namelijk getrokken worden uit de andere mortels. Ter staving werden ook enkele van deze resultaten weergegeven. Voor de verschillende proefstukken werd het vochtgehalte over het gehele proefstuk uitgezet in functie van de tijd. Dit gedurende tien dagen.

- Figuren 10.27 geven het vochtgehalte over hydraulische kalkmortel met baksteen weer voor verschillende grensweerstand tussen baksteen en mortel. De baksteen heeft een lagere absorptiecoëfficiënt.
- Figuren 10.28 geven het vochtgehalte over hydraulische kalkmortel met baksteen weer voor verschillende grensweerstand tussen baksteen en mortel. De baksteen heeft een gelijke absorptiecoëfficiënt.
- Figuren 10.29 geven het vochtgehalte over hydraulische kalkmortel met baksteen weer voor verschillende grensweerstand tussen baksteen en mortel. De baksteen heeft een hogere absorptiecoëfficiënt.
- Figuren 10.30 geven het vochtgehalte over een gecombineerd proefstuk (hydraulische kalk) met baksteen weer voor verschillende grensweerstand tussen baksteen en mortel. De baksteen heeft een lagere absorptiecoëfficiënt.
- Figuren 10.31 geven het vochtgehalte over een gecombineerd proefstuk (hydraulische kalk) met baksteen weer voor verschillende grensweerstand tussen baksteen en mortel. De baksteen heeft een gelijke absorptiecoëfficiënt.
- Figuren 10.32 geven het vochtgehalte over een gecombineerd proefstuk (hydraulische kalk) met baksteen weer voor verschillende grensweerstand tussen baksteen en mortel. De baksteen heeft een hogere absorptiecoëfficiënt.
- Figuren 10.33 geven het vochtgehalte over luchtkalkmortel met baksteen weer voor verschillende grensweerstand tussen baksteen en mortel. De baksteen heeft een lagere absorptiecoëfficiënt.
- Figuren 10.34 geven het vochtgehalte over historische kalkmortel met baksteen weer voor verschillende grensweerstand tussen baksteen en mortel. De baksteen heeft een lagere absorptiecoëfficiënt.
- Figuren 10.35 geven het vochtgehalte over cementmortel met baksteen weer voor verschillende grensweerstand tussen baksteen en mortel. De baksteen heeft een lagere absorptiecoëfficiënt.
- Figuren 10.36 geven het vochtgehalte over een gecombineerd proefstuk (luchtkalk) met baksteen weer voor verschillende grensweerstand tussen baksteen en mortel. De baksteen heeft een lagere absorptiecoëfficiënt.
- Figuren 10.37 geven het vochtgehalte over een gecombineerd proefstuk (historische kalk) met baksteen weer voor verschillende grensweerstand tussen baksteen en mortel. De baksteen heeft een lagere absorptiecoëfficiënt.

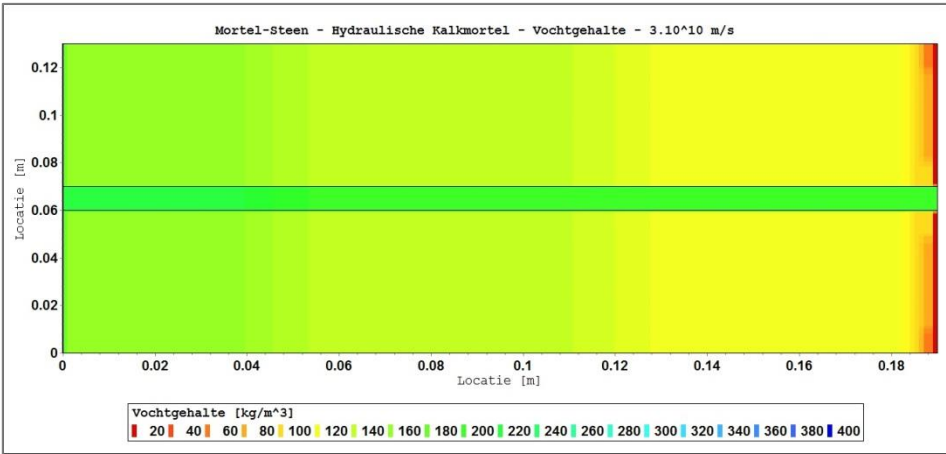
VOCHTGEHALTE HYDRAULISCHE KALKMORTEL EN STEEN (LAGERE A_w)



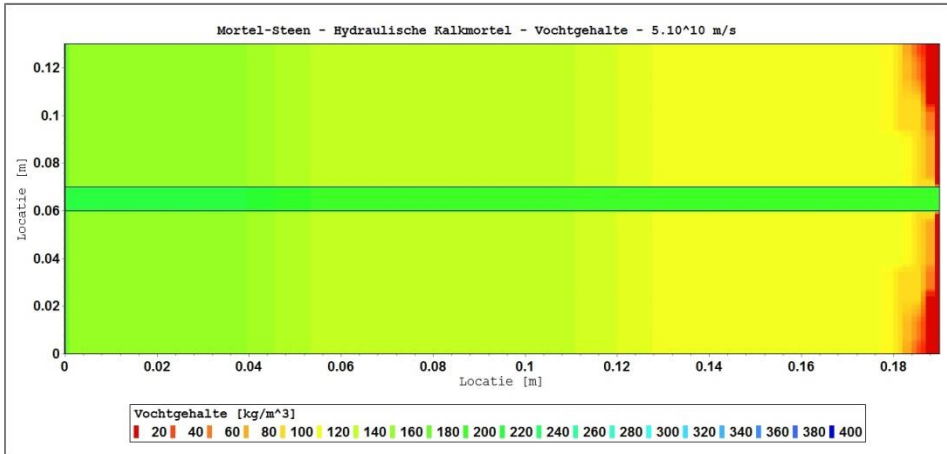
Figuur 10.27-A| Hydraulische Kalkmortel – Steen – Laag - Vochtgehalte - Perfect



Figuur 10.27-B| Hydraulische Kalkmortel - Steen – Laag - Vochtgehalte – 1.10^{10} m/s

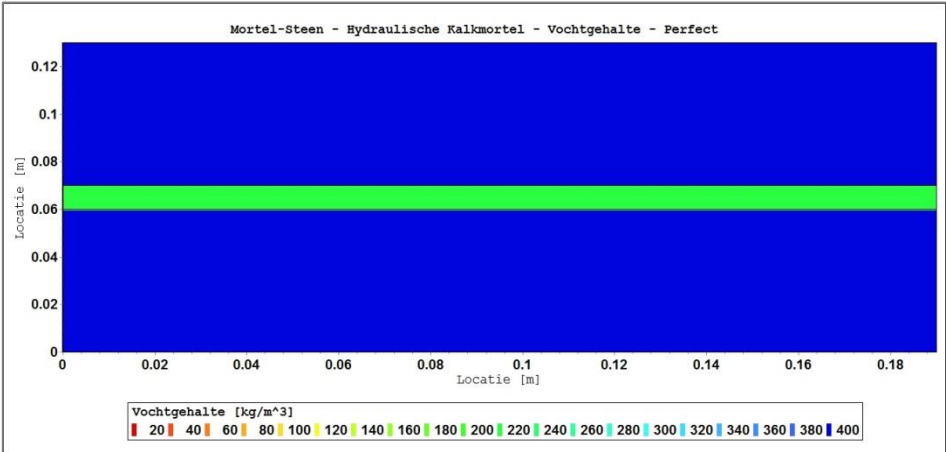


Figuur 10.27-C| Hydraulische Kalkmortel – Steen – Laag - Vochtgehalte – 3.10^{10} m/s

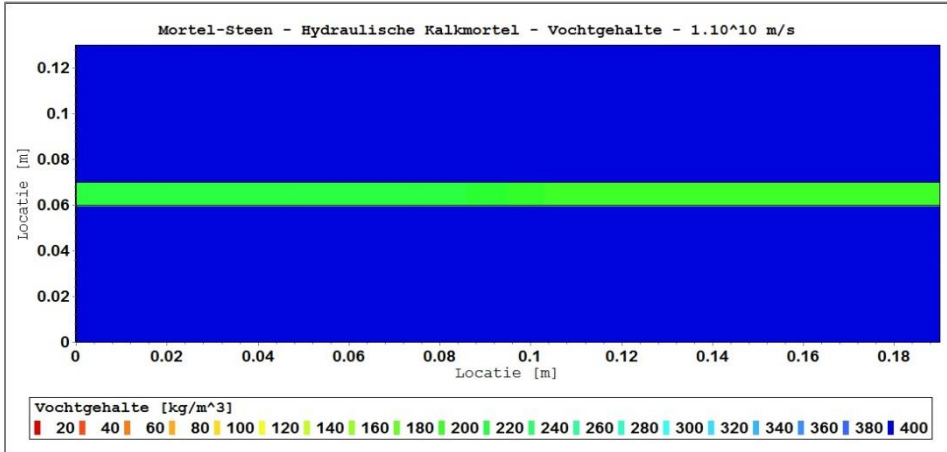


Figuur 10.27-D| Hydraulische Kalkmortel - Steen - Laag - Vochtgehalte – 5.10^{10} m/s

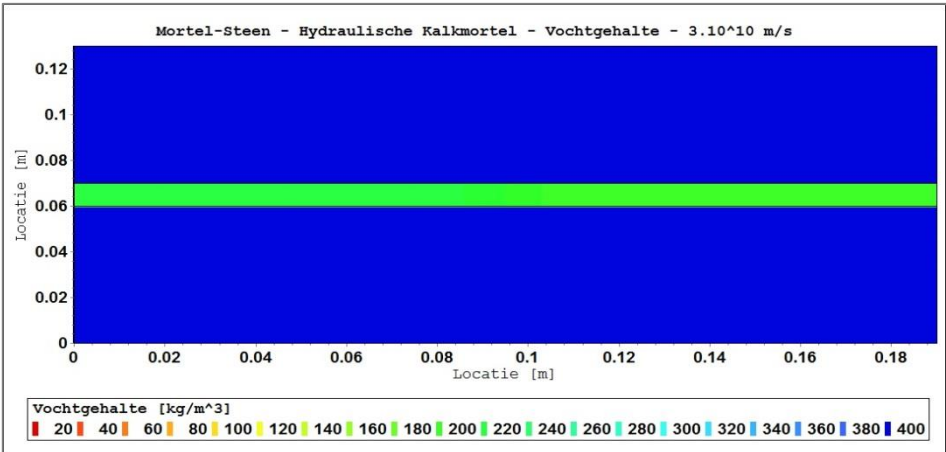
VOCHTGEHALTE HYDRAULISCHE KALKMORTEL EN STEEN (GELIJKE A_w)



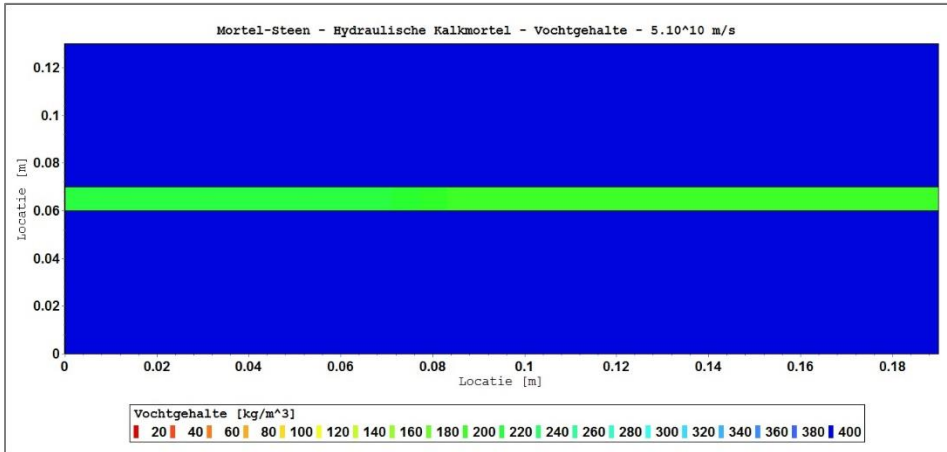
Figuur 10.28-A| Hydraulische Kalkmortel - Steen - Vochtgehalte - Perfect



Figuur 10.28-B| Hydraulische Kalkmortel Steen - Vochtgehalte – 1.10^{10} m/s

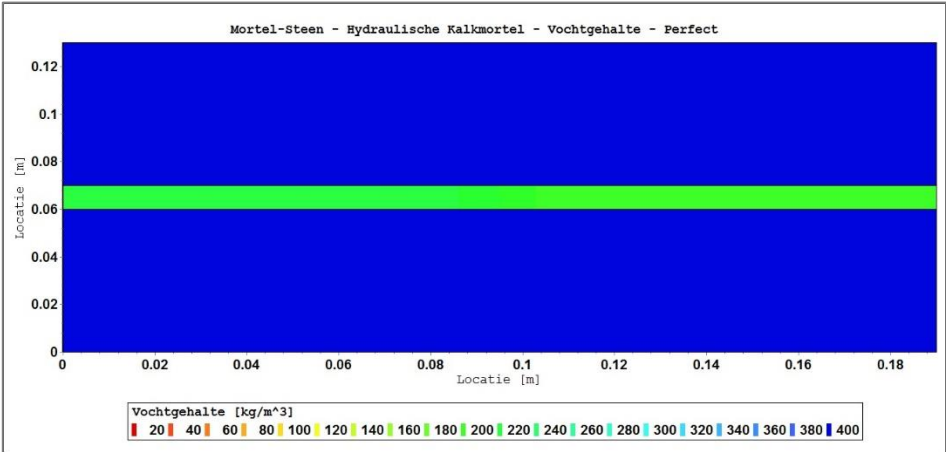


Figuur 10.28-C| Hydraulische Kalkmortel – Steen - Vochtgehalte – 3.10^{10} m/s

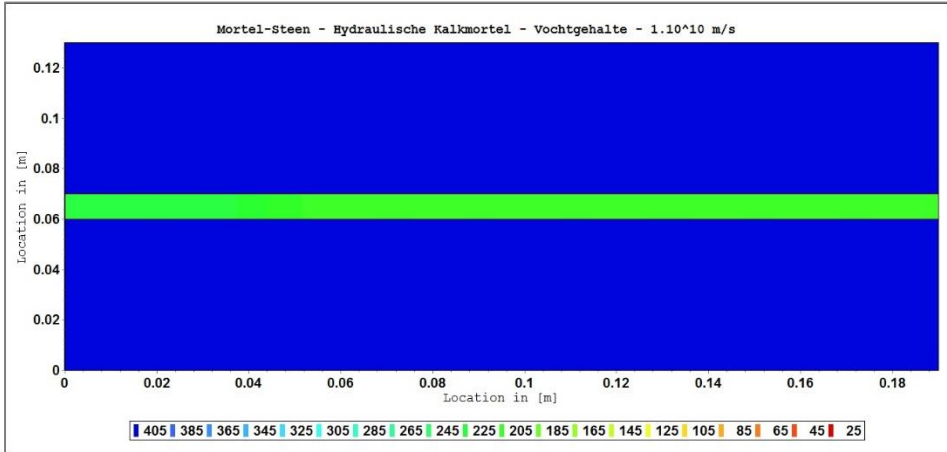


Figuur 10.28-D| Hydraulische Kalkmortel Steen - Vochtgehalte – 5.10^{10} m/s

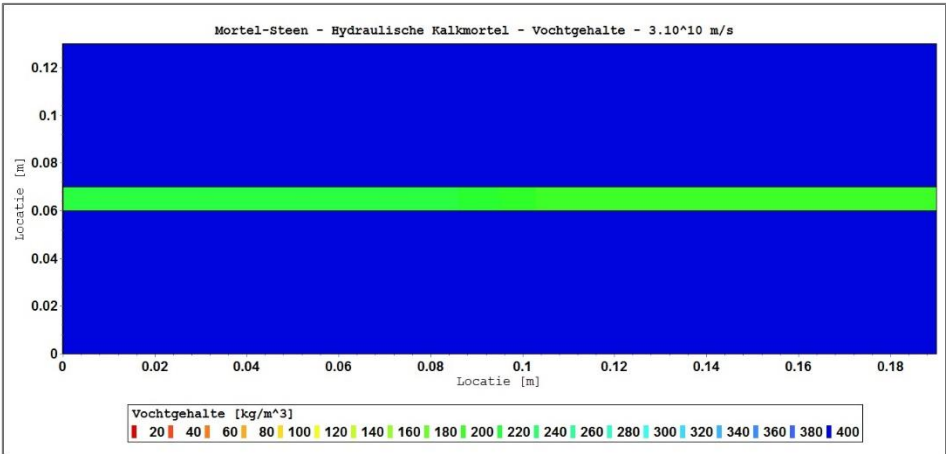
VOCHTGEHALTE HYDRAULISCHE KALKMORTEL EN STEEN (HOGERE A_w)



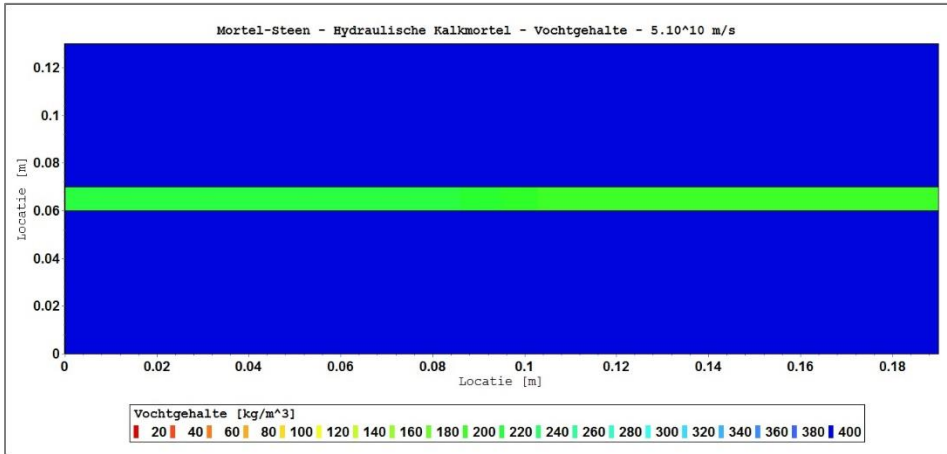
Figuur 10.29-A| Hydraulische Kalkmortel - Steen - Vochtgehalte - Perfect



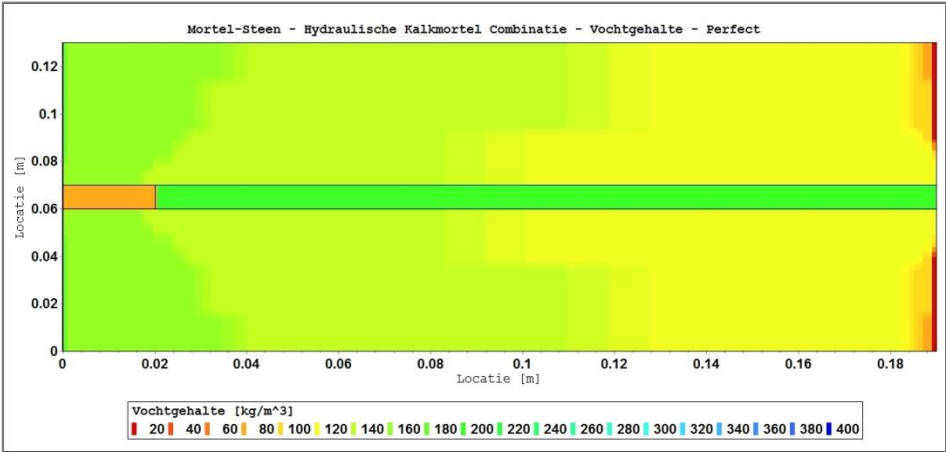
Figuur 10.29-B| Hydraulische Kalkmortel Steen - Vochtgehalte – 1.10¹⁰ m/s



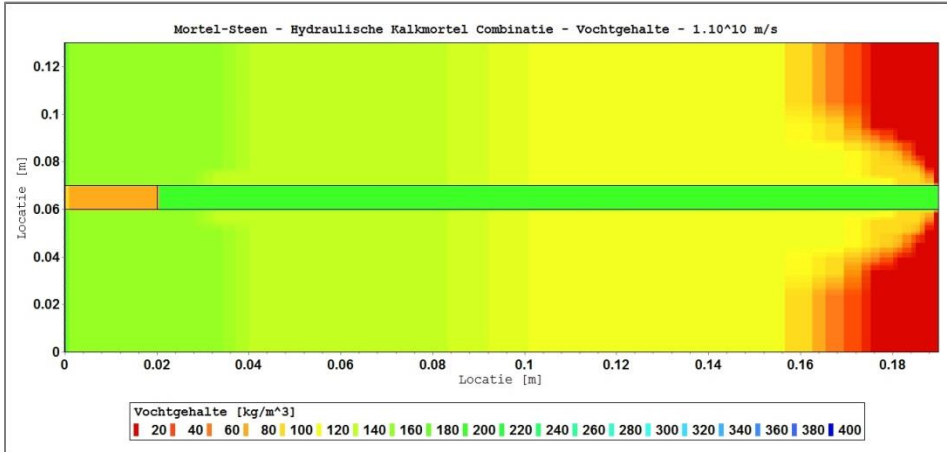
Figuur 10.29-C| Hydraulische Kalkmortel – Steen - Vochtgehalte – 3.10¹⁰ m/s



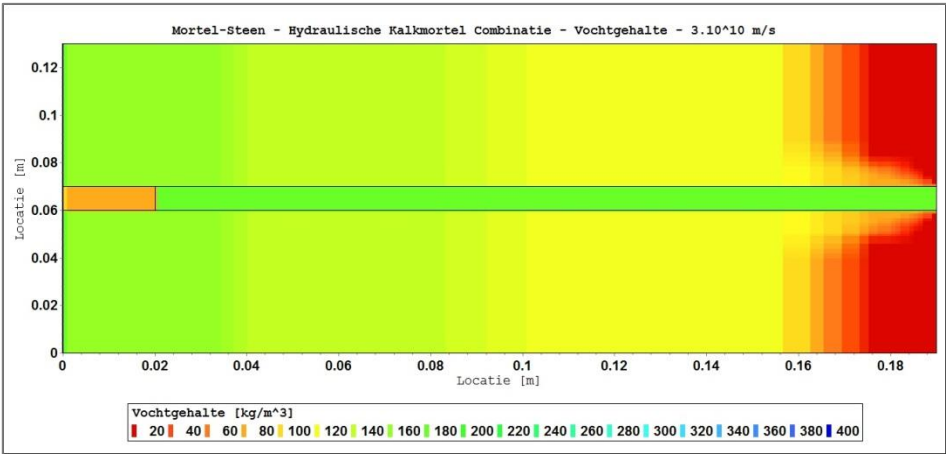
Figuur 10.29-D| Hydraulische Kalkmortel Steen - Vochtgehalte – 5.10¹⁰ m/s



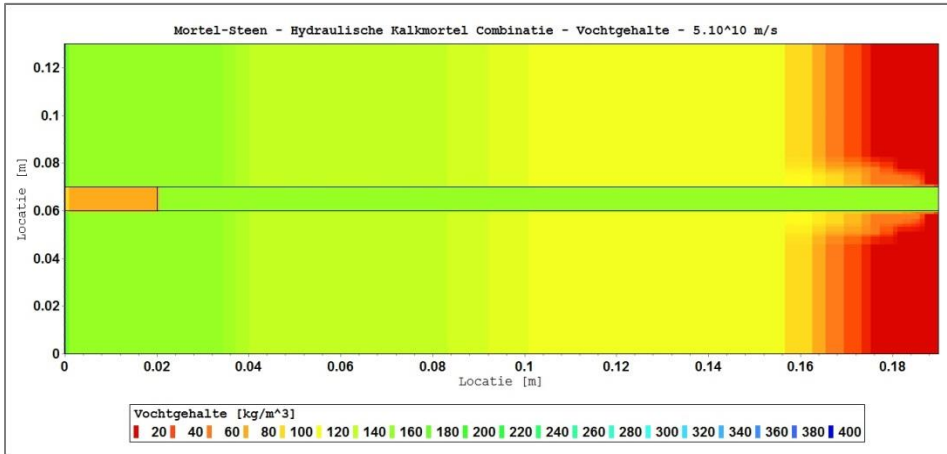
Figuur 10.30-A| Hydraulische Kalkmortel Comb. – Steen - Vochtgehalte - Perfect



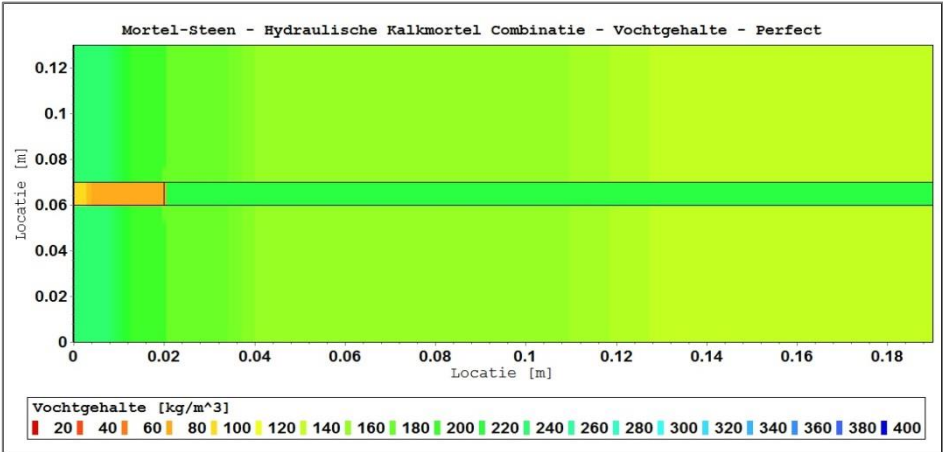
Figuur 10.30-B| Hydraulische Kalkmortel Comb. - Steen - Vochtgehalte – 1.10¹⁰ m/s



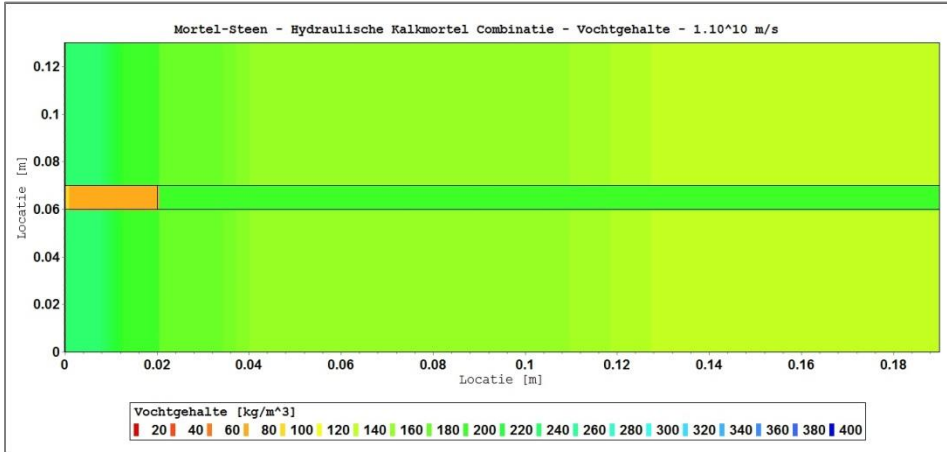
Figuur 10.30-C| Hydraulische Kalkmortel Comb. – Steen - Vochtgehalte – 3.10¹⁰ m/s



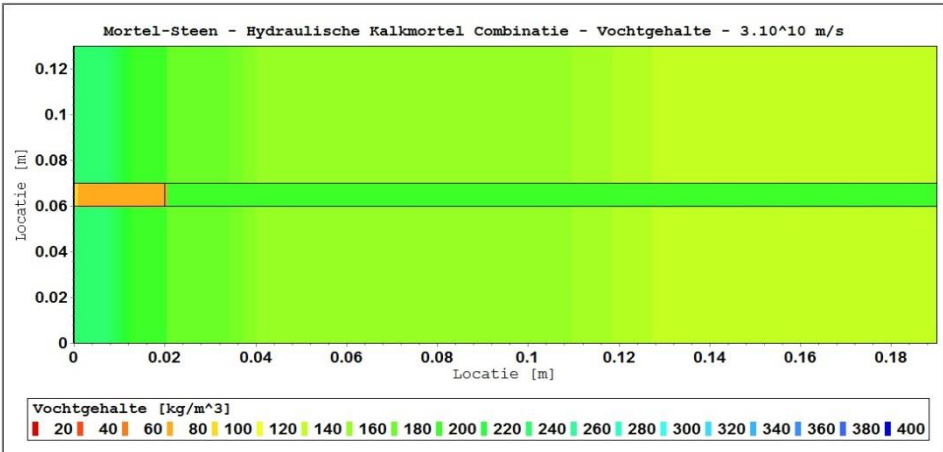
Figuur 10.30-D| Hydraulische Kalkmortel Comb. - Steen - Vochtgehalte – 5.10¹⁰ m/s



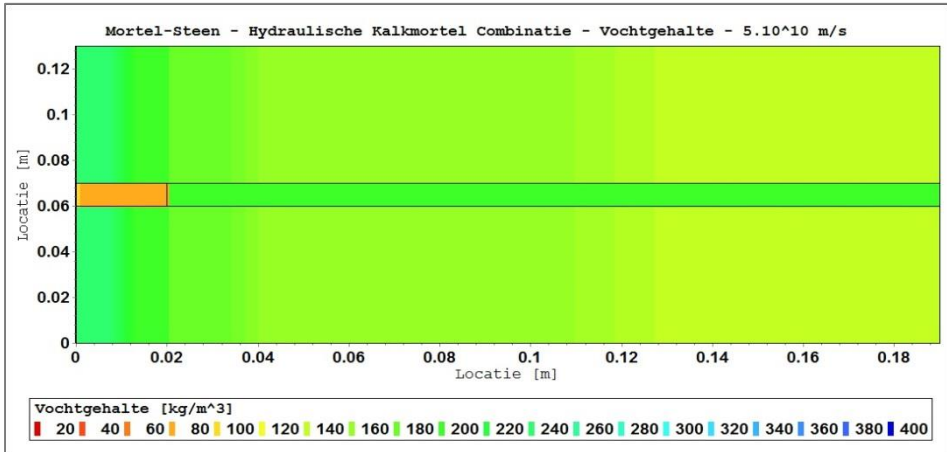
Figuur 10.31-A| Hydraulische Kalkmortel Comb. – Steen - Vochtgehalte - Perfect



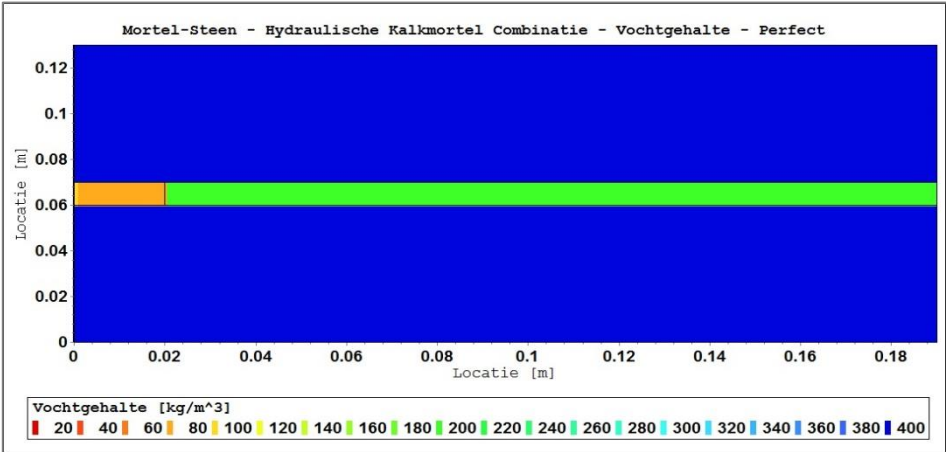
Figuur 10.31-B| Hydraulische Kalkmortel Comb. - Steen - Vochtgehalte – 1.10¹⁰ m/s



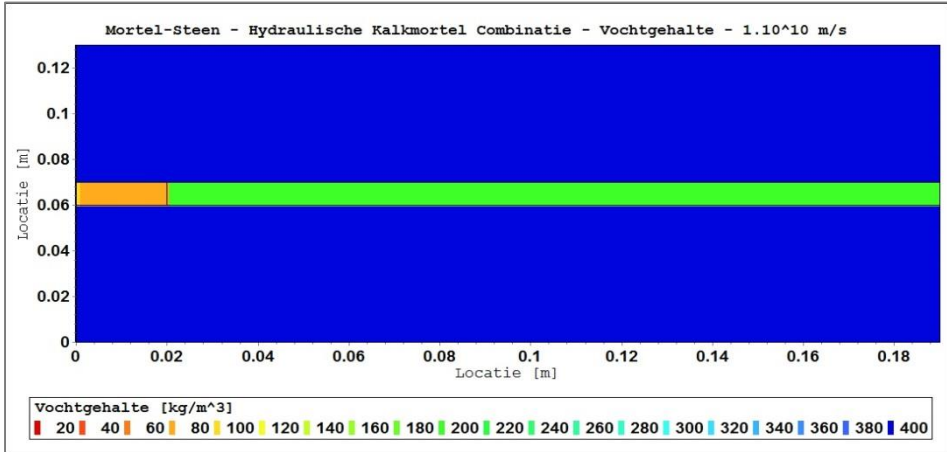
Figuur 10.31-C| Hydraulische Kalkmortel Comb. – Steen - Vochtgehalte – 3.10¹⁰ m/s



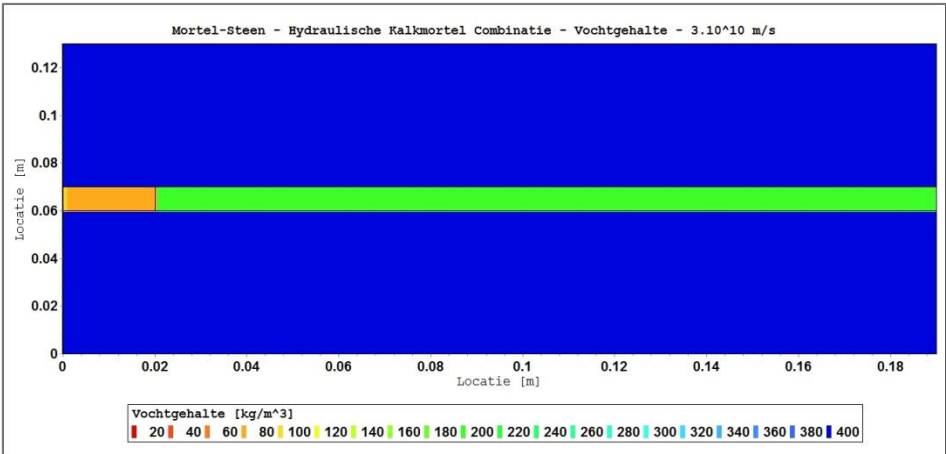
Figuur 10.31-D| Hydraulische Kalkmortel Comb. - Steen - Vochtgehalte – 5.10¹⁰ m/s



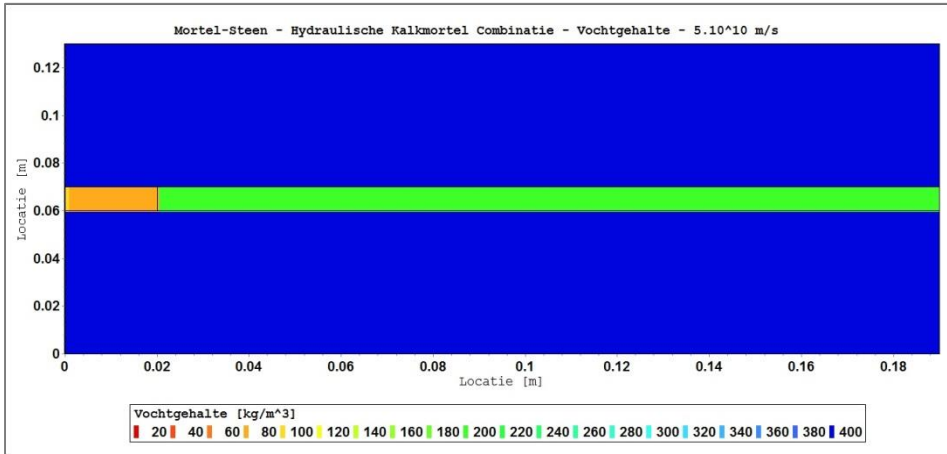
Figuur 10.32-A| Hydraulische Kalkmortel Comb. – Steen - Vochtgehalte - Perfect



Figuur 10.32-B| Hydraulische Kalkmortel Comb. - Steen - Vochtgehalte – 1.10¹⁰ m/s

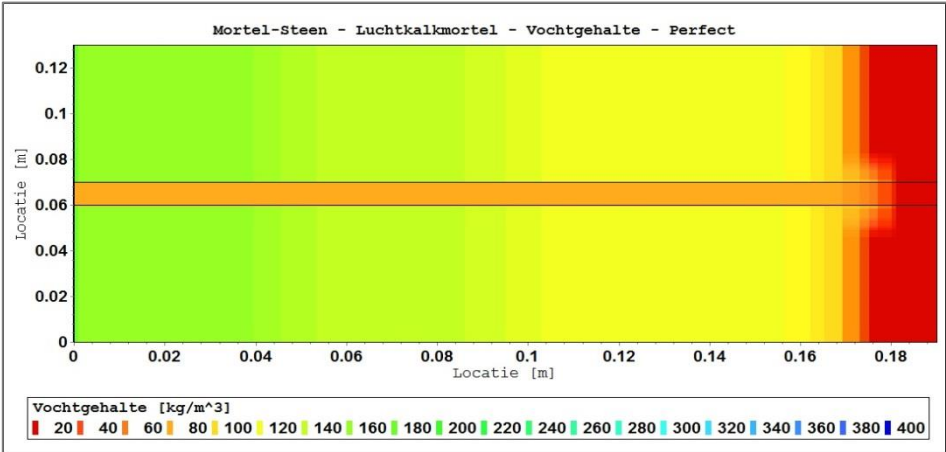


Figuur 10.32-C | Hydraulische Kalkmortel Comb. – Steen - Vochtgehalte – 3.10¹⁰ m/s

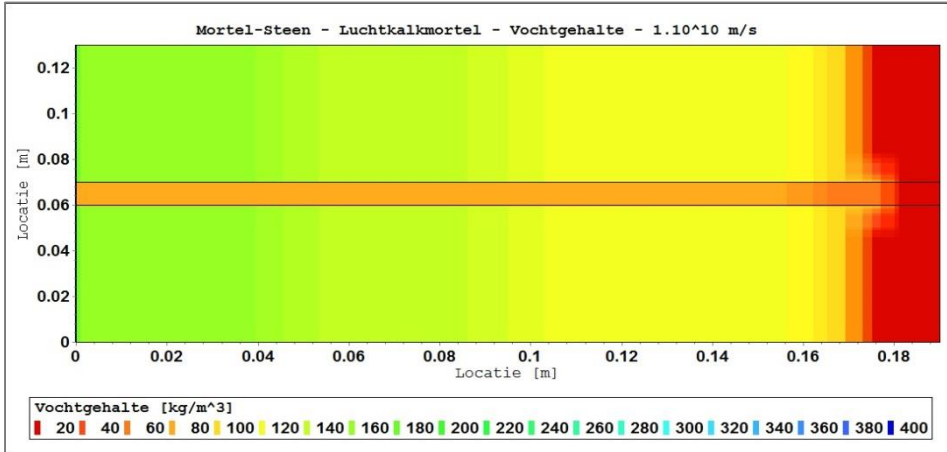


Figuur 10.32-D| Hydraulische Kalkmortel Comb. - Steen - Vochtgehalte – 5.10¹⁰ m/s

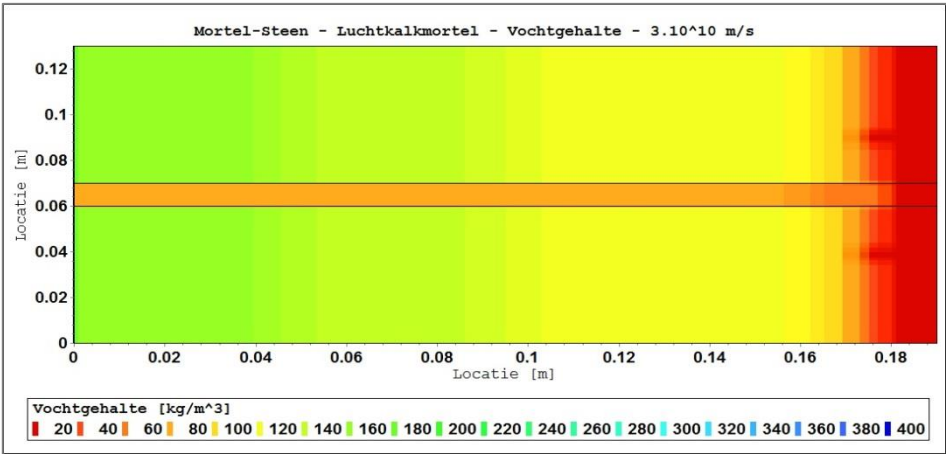
VOCHTGEHALTE LUCHTKALKMORTEL EN STEEN (LAGERE A_w)



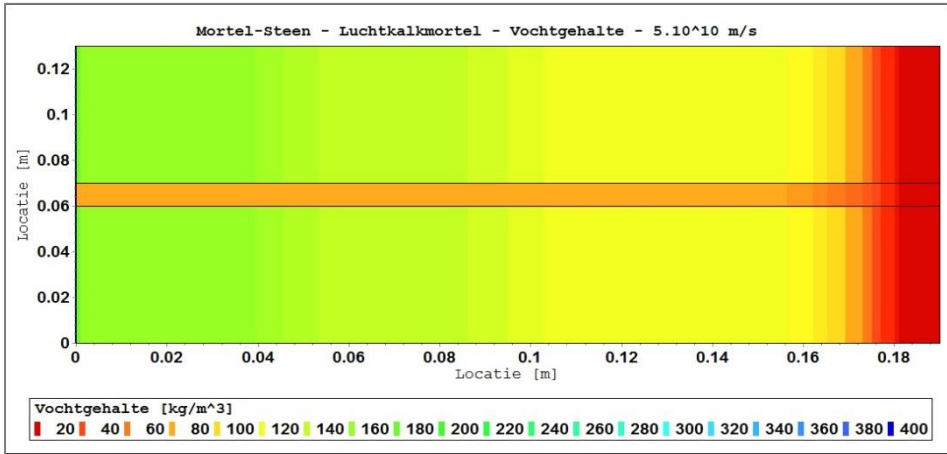
Figuur 10.33-A| Luchtkalkmortel – Steen – Laag - Vochtgehalte - Perfect



Figuur 10.33-B| Luchtkalkmortel - Steen – Laag - Vochtgehalte – 1.10^{10} m/s

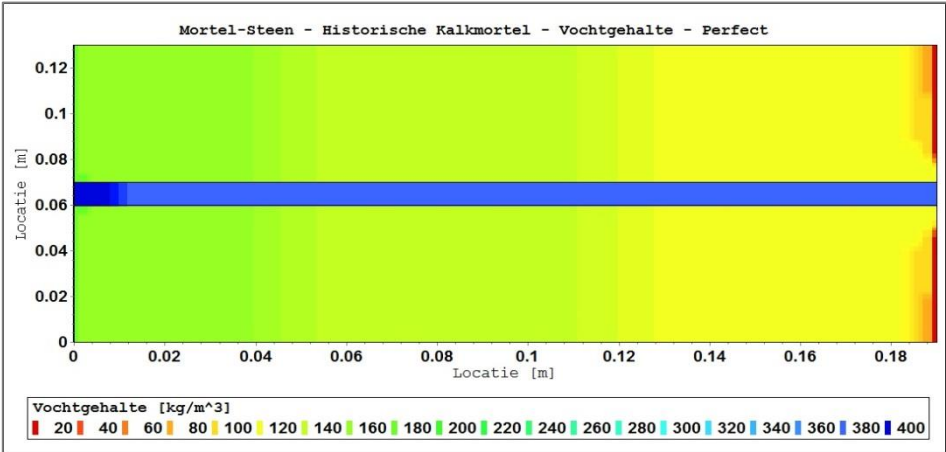


Figuur 10.33-C| Luchtkalkmortel – Steen – Laag - Vochtgehalte – 3.10^{10} m/s

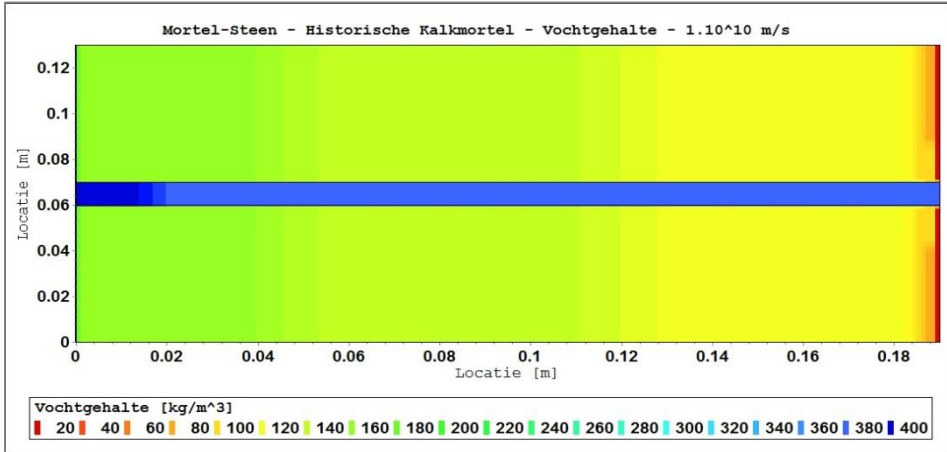


Figuur 10.33-D| Luchtkalkmortel - Steen - Laag - Vochtgehalte – 5.10^{10} m/s

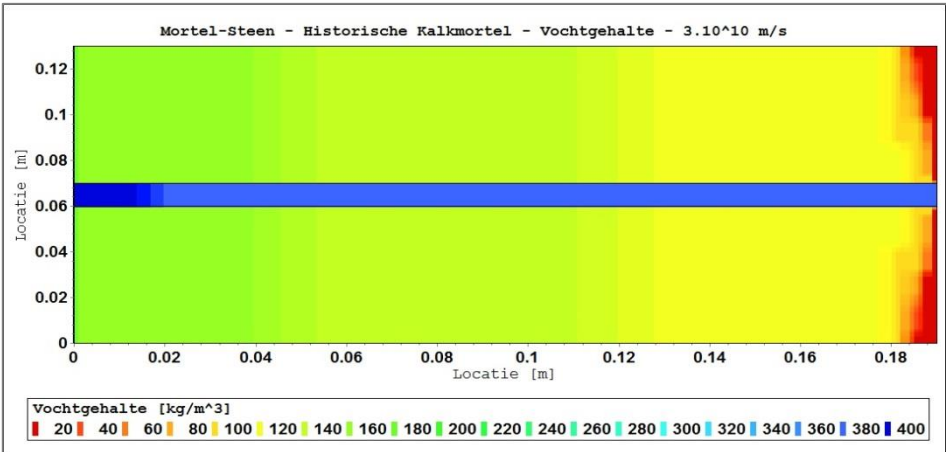
VOCHTGEHALTE HISTORISCHE KALKMORTEL EN STEEN (LAGERE A_w)



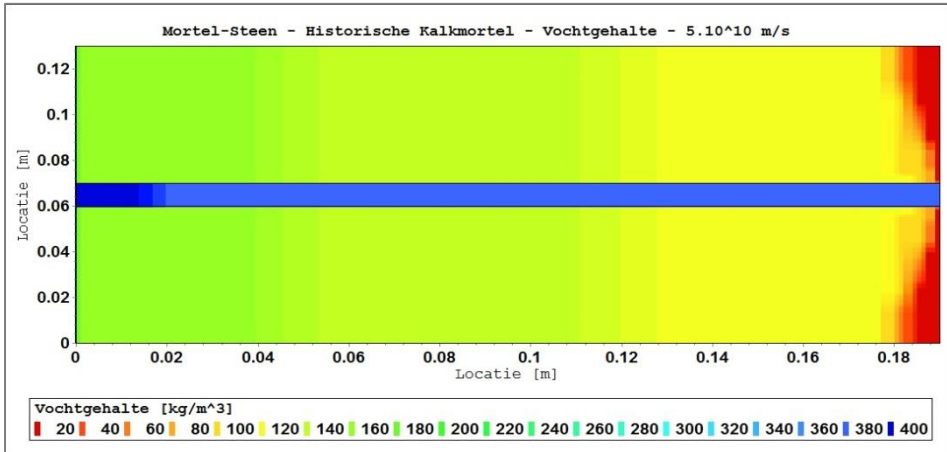
Figuur 10.34-A| Historische Kalkmortel – Steen – Laag - Vochtgehalte - Perfect



Figuur 10.34-B| Historische Kalkmortel - Steen – Laag - Vochtgehalte – 1.10^{10} m/s

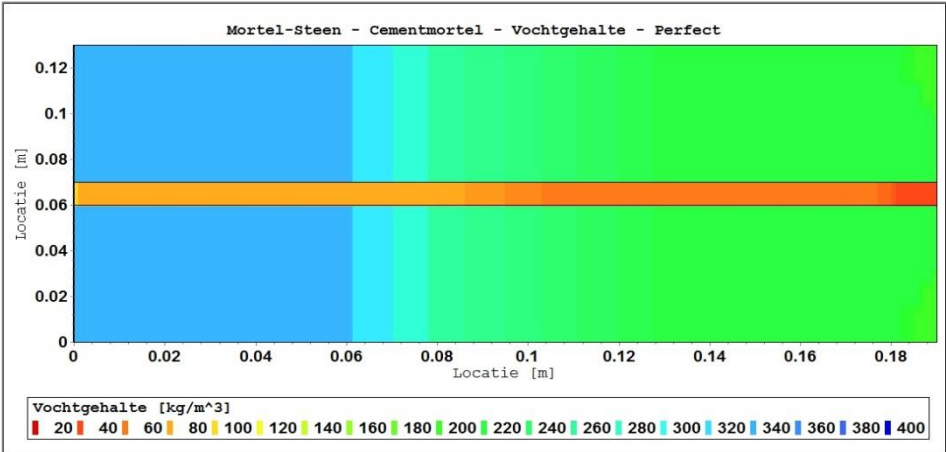


Figuur 10.34-C| Historische Kalkmortel – Steen – Laag - Vochtgehalte – 3.10^{10} m/s

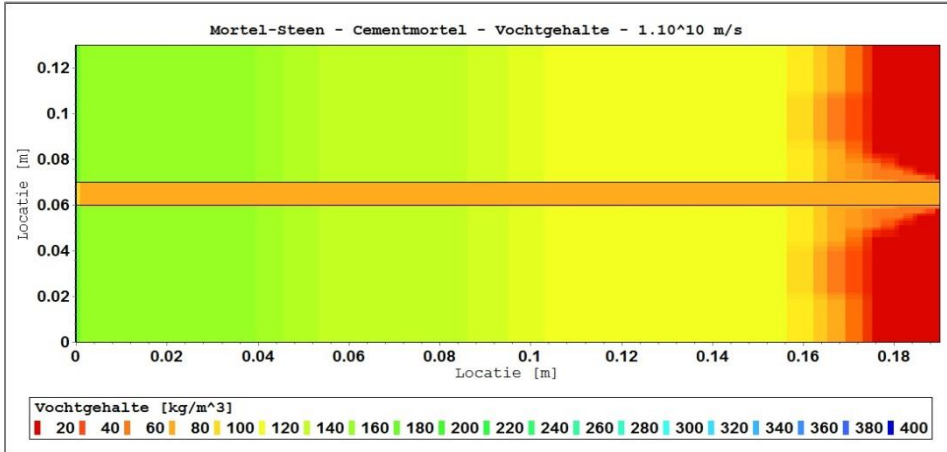


Figuur 10.34-D| Historische Kalkmortel - Steen - Laag - Vochtgehalte – 5.10^{10} m/s

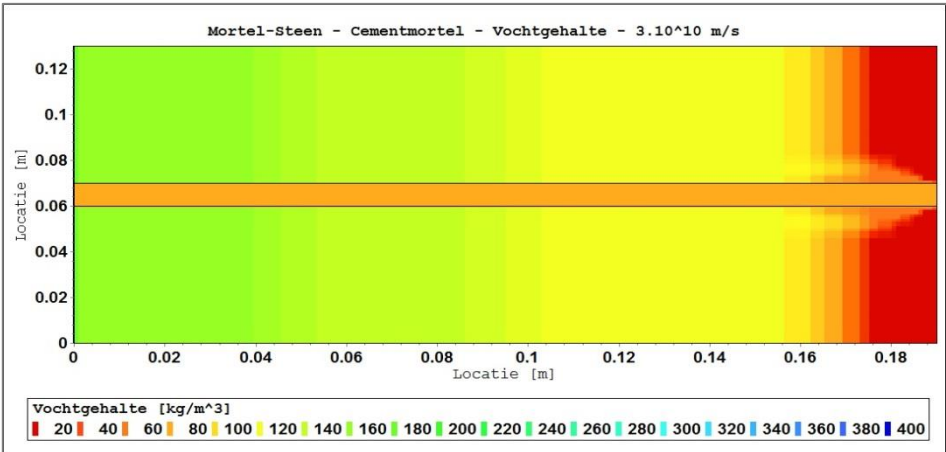
VOCHTGEHALTE CEMENTMORTEL EN STEEN (LAGERE A_w)



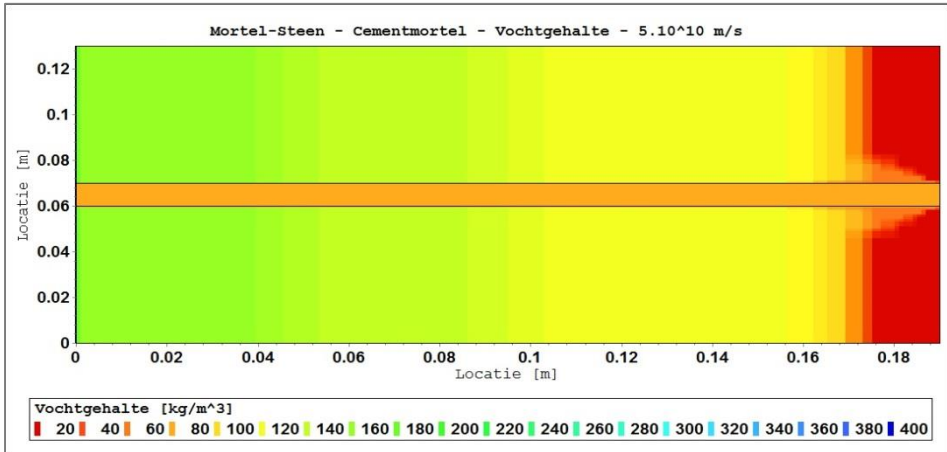
Figuur 10.35-A| Cementmortel – Steen – Laag - Vochtgehalte - Perfect



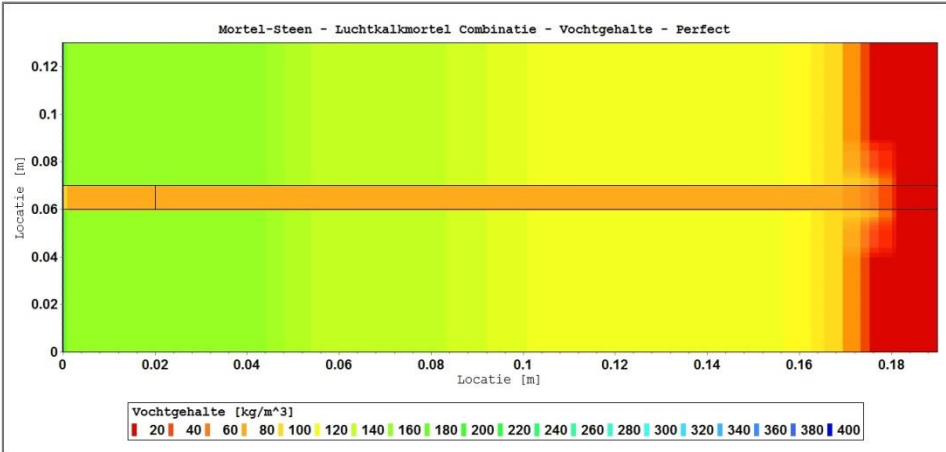
Figuur 10.35-B| Cementmortel - Steen – Laag - Vochtgehalte – 1.10^{10} m/s



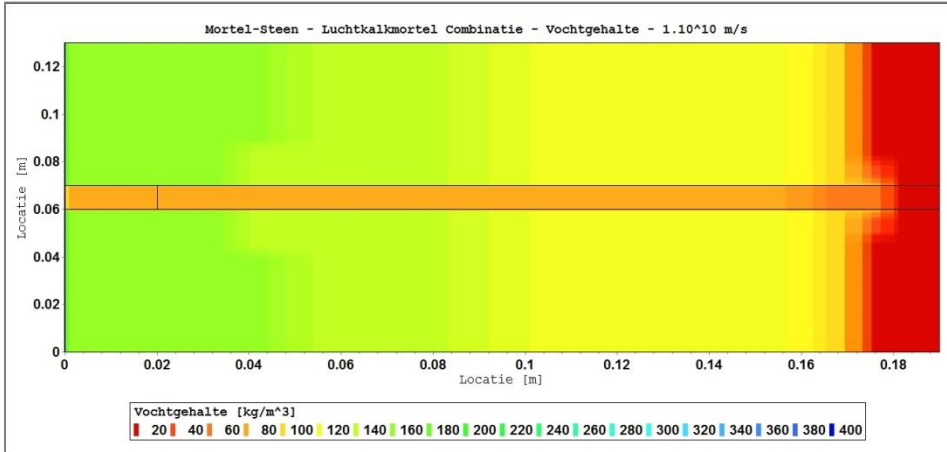
Figuur 10.35-C| Cementmortel – Steen – Laag - Vochtgehalte – 3.10^{10} m/s



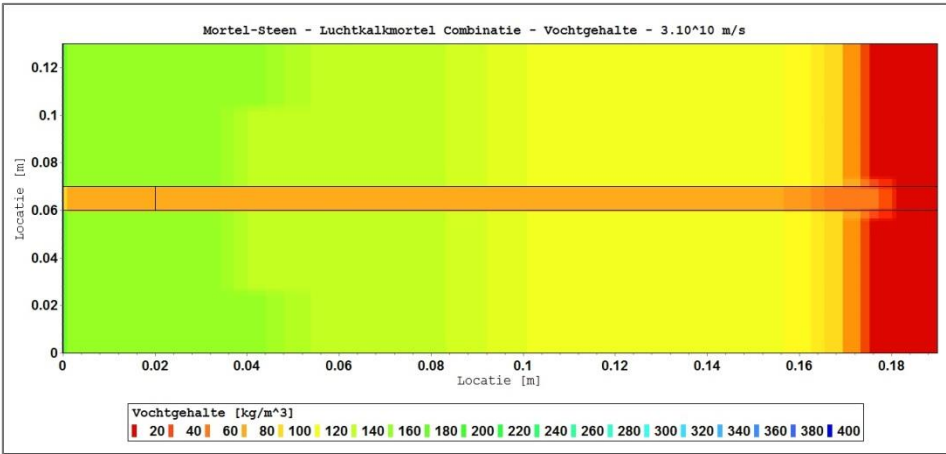
Figuur 10.35-D| Cementmortel - Steen - Laag - Vochtgehalte – 5.10^{10} m/s



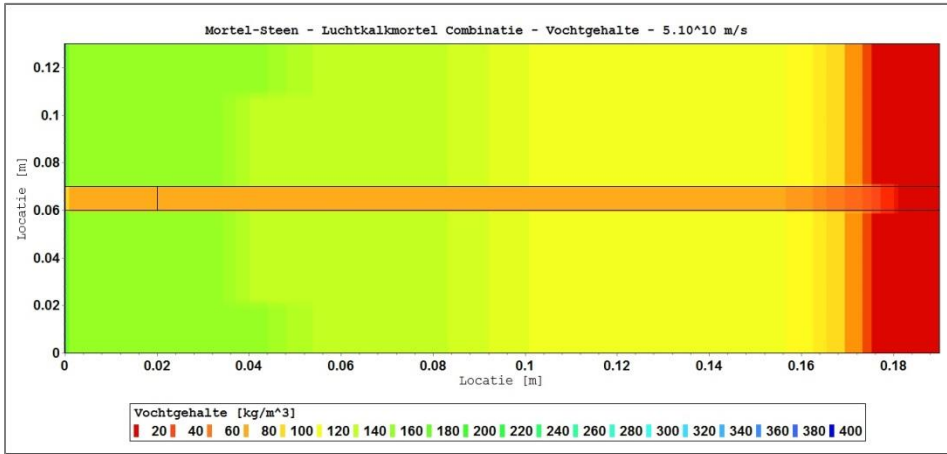
Figuur 10.36-A| Luchtkalkmortel Comb. – Steen - Vochtgehalte - Perfect



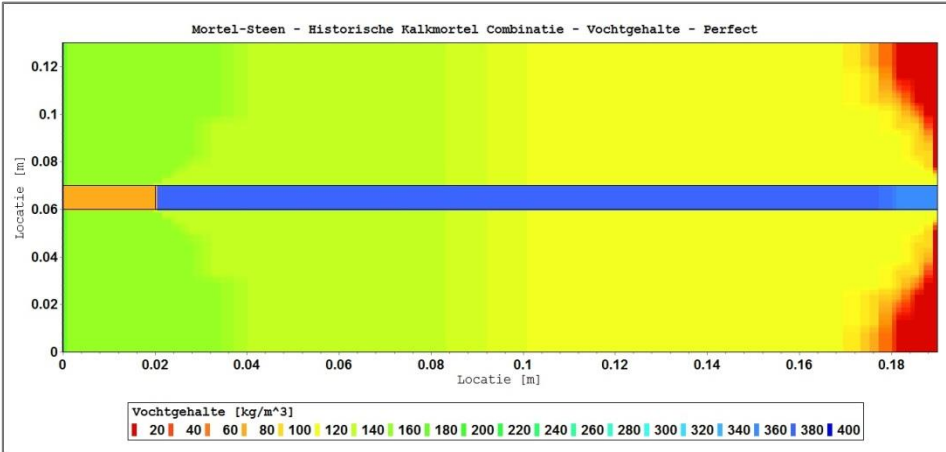
Figuur 10.36-B| Luchtkalkmortel Comb. - Steen - Vochtgehalte – 1.10¹⁰ m/s



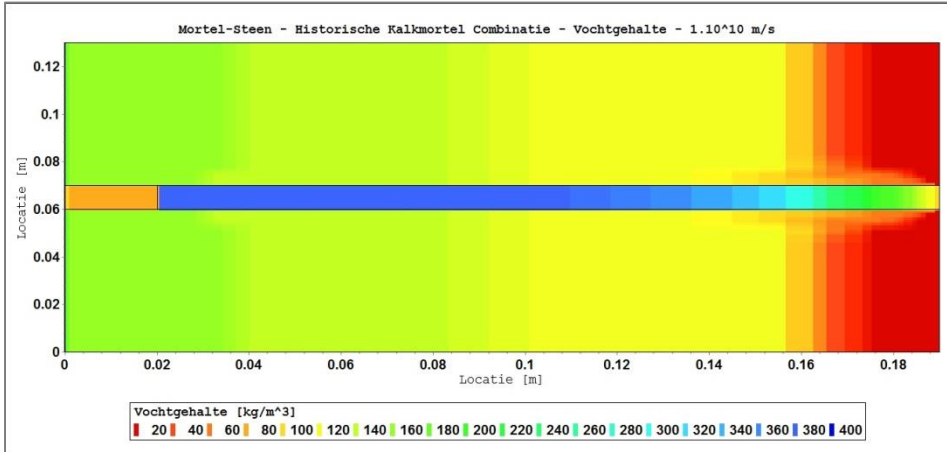
Figuur 10.36-C| Luchtkalkmortel Comb. – Steen - Vochtgehalte – 3.10¹⁰ m/s



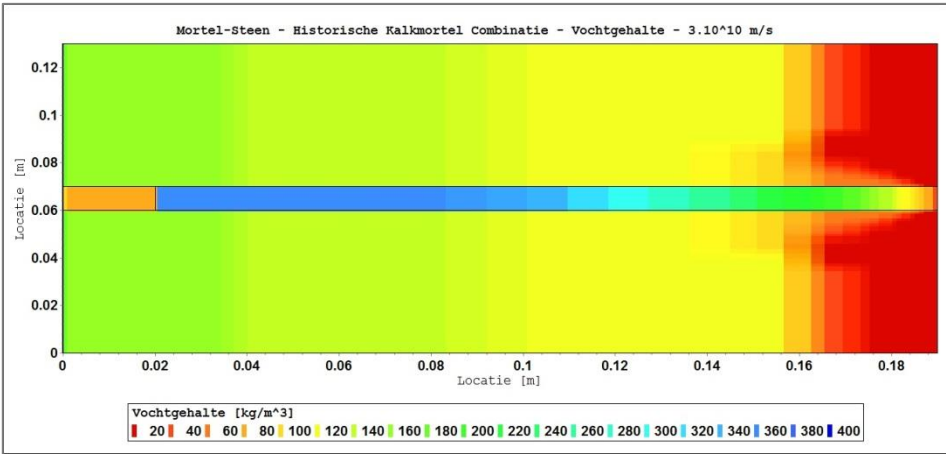
Figuur 10.36-D| Luchtkalkmortel Comb. - Steen - Vochtgehalte – 5.10¹⁰ m/s



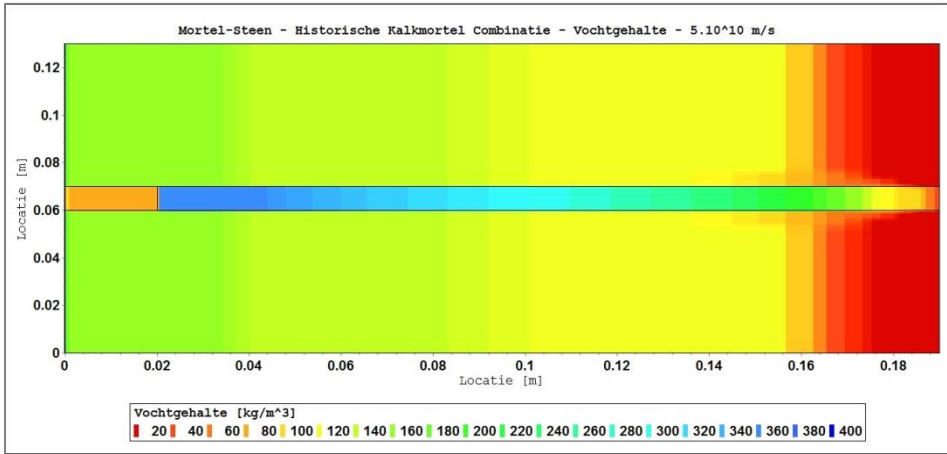
Figuur 10.37-A| Historische Kalkmortel Comb. – Steen - Vochtgehalte - Perfect



Figuur 10.37-B| Historische Kalkmortel Comb. - Steen - Vochtgehalte – 1.10¹⁰ m/s



Figuur 10.37-C| Historische Kalkmortel Comb. – Steen - Vochtgehalte – 3.10¹⁰ m/s



Figuur 10.37-D| Historische Kalkmortel Comb. - Steen - Vochtgehalte – 5.10¹⁰ m/s

E.3| MASSIEVE MUUR MODELLEN

| VOCHTGEHALTE

Wegens de beknoptheid van deze thesis werd er geopteerd om enkel de simulaties van de hydraulische kalkmortel, zowel puur als gecombineerd, weer te geven in combinatie met de drie bakstenen. Eenzelfde conclusies kunnen namelijk getrokken worden uit de andere mortels. Ter staving werd ook de mould index van deze resultaten weergegeven. Voor de verschillende proefstukken werd het vochtgehalte over het gehele proefstuk uitgezet in functie van de tijd, gedurende een volledig jaar. Er werd ervoor gekozen om de resultaten na vochtabsorptie (op 14 dagen) en na een droge periode (op 210 dagen) weer te geven.

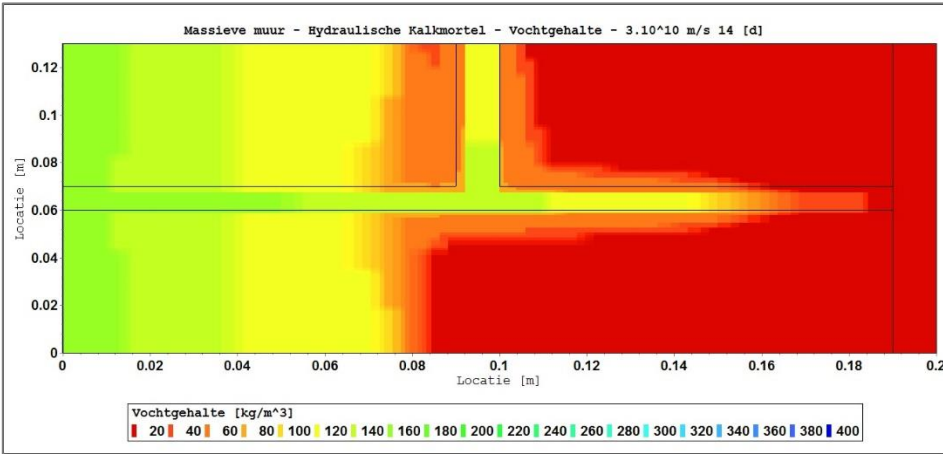
- Figuren 10.38 geven het vochtgehalte over hydraulische kalkmortel (al dan niet gecombineerd met cement) met baksteen weer voor verschillende momenten tussen baksteen en mortel. De baksteen heeft een lagere absorptiecoëfficiënt.
- Figuren 10.39 geven het vochtgehalte over hydraulische kalkmortel (al dan niet gecombineerd met cement) met baksteen weer voor verschillende momenten tussen baksteen en mortel. De baksteen heeft een gelijke absorptiecoëfficiënt.
- Figuren 10.40 geven het vochtgehalte over hydraulische kalkmortel (al dan niet gecombineerd met cement) met baksteen weer voor verschillende momenten tussen baksteen en mortel. De baksteen heeft een hogere absorptiecoëfficiënt.
- Figuren 10.41 geven het vochtgehalte voor een gehomogeniseerde baksteenwand weer. Dit voor bakstenen met een algemeen hoge en lage absorptiecoëfficiënt.
- Figuren 10.42 geven het vochtgehalte voor een gehomogeniseerde baksteenwand weer. Dit voor bakstenen met een gelijke absorptiecoëfficiënt aan hydraulische kalkmortel (puur en gecombineerd).
- Figuren 10.43 geven het vochtgehalte voor een gehomogeniseerde baksteenwand weer. Dit voor bakstenen met een hoge absorptiecoëfficiënt in vergelijking met hydraulische kalkmortel.
- Figuren 10.44 geven het vochtgehalte voor een gehomogeniseerde baksteenwand weer. Dit voor bakstenen met een gelijke absorptiecoëfficiënt aan historische kalkmortel (puur en gecombineerd).
- Figuren 10.45 geven het vochtgehalte voor een gehomogeniseerde baksteenwand weer. Dit voor bakstenen met een gelijke absorptiecoëfficiënt aan luchtkalk- en cementmortel (puur en gecombineerd).

| MOULD INDEX

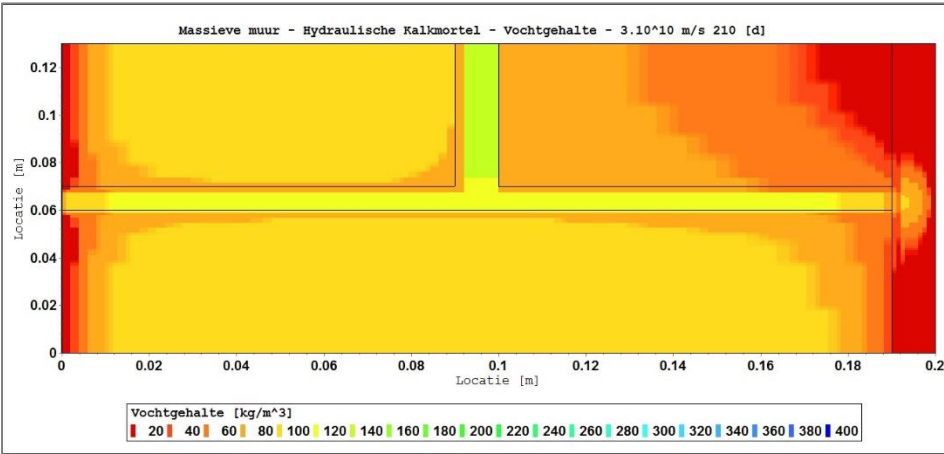
- Figuren 10.46 geven de mould indices van de massieve muur met verschillende mortels weer halweg de bovenste baksteen, halweg de onderste en ter hoogte van de mortel. De baksteen heeft een lagere absorptiecoëfficiënt.
- Figuren 10.47 geven de mould indices van de massieve muur met verschillende gecombineerde mortels weer halweg de bovenste baksteen, halweg de onderste en ter hoogte van de mortel. De baksteen heeft een lagere absorptiecoëfficiënt.
- Figuren 10.48 geven de mould indices van de massieve muur met verschillende mortels weer halweg de bovenste baksteen, halweg de onderste en ter hoogte van de mortel. De baksteen heeft een gelijke absorptiecoëfficiënt.
- Figuren 10.49 geven de mould indices van de massieve muur met verschillende mortels weer halweg de bovenste baksteen, halweg de onderste en ter hoogte van de mortel. De baksteen heeft een hogere absorptiecoëfficiënt.
- Figuren 10.50 geven de mould indices van een gehomogeniseerde baksteenwand weer halweg de wand. De bakstenen hebben een algemeen lage of hoge (ook in vergelijking met hydraulische kalkmortel) absorptiecoëfficiënt.
- Figuren 10.51 geven de mould indices van een gehomogeniseerde baksteenwand weer halweg de wand. De bakstenen hebben een gelijke absorptiecoëfficiënt aan de kalkmortels (zowel puur als gecombineerd).

VOCHTGEHALTE MASSIEVE MUUR HYDRAULISCHE KALKMORTEL

(LAGERE A_w)



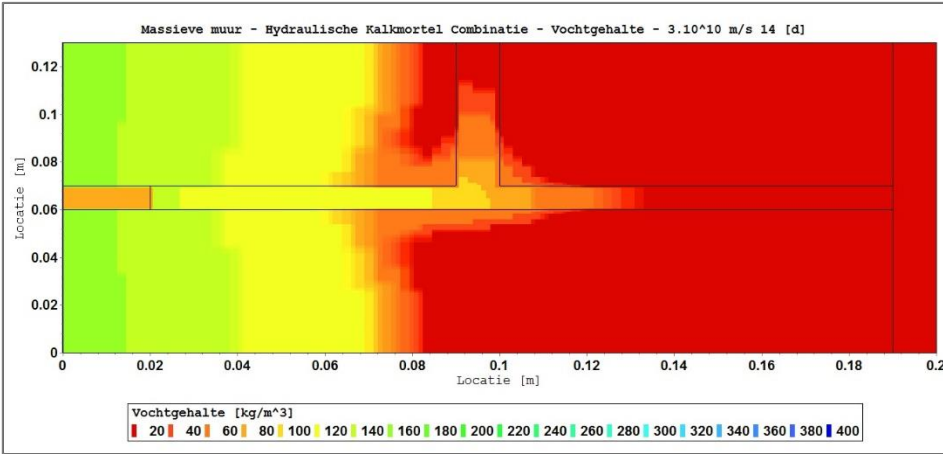
Figuur 10.38-A| Massieve muur - Hydraulische Kalkmortel - Vochtgehalte - 14 dagen



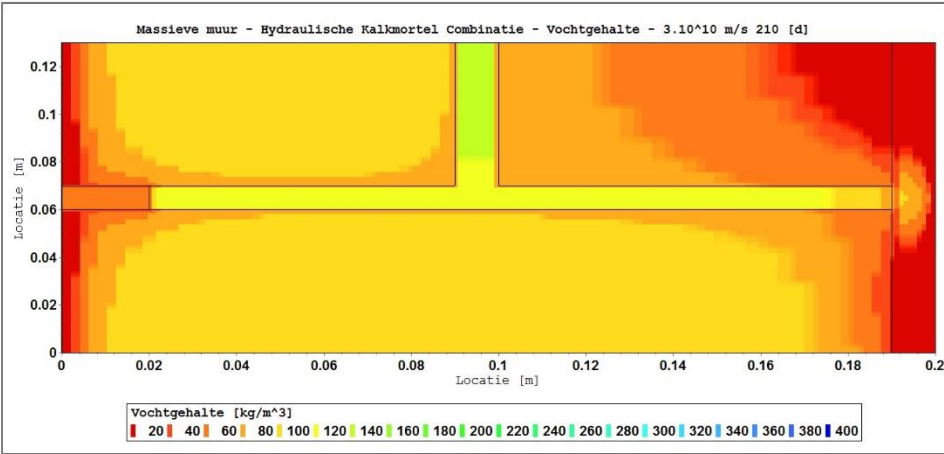
Figuur 10.38-B| Massieve muur - Hydraulische Kalkmortel - Vochtgehalte - 210 dagen

VOCHTGEHALTE MASSIEVE MUUR COMBINATIE HYDRAULISCHE KALKMORTEL

(LAGERE A_w)



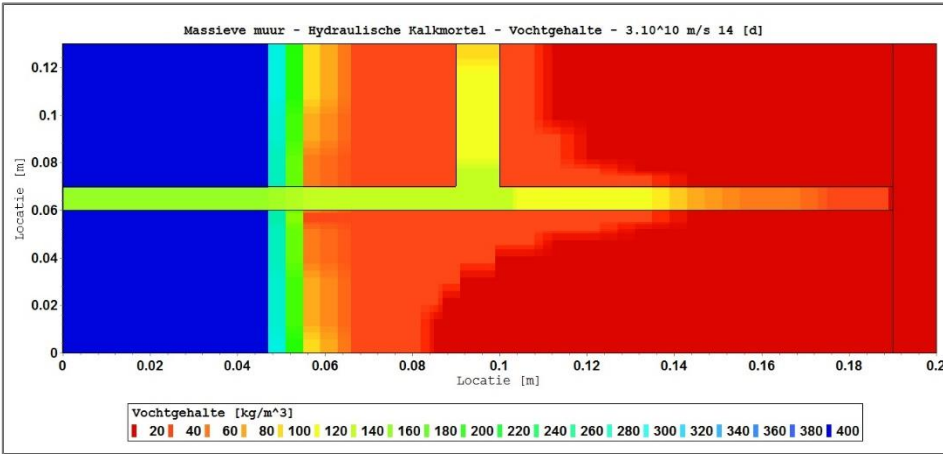
Figuur 10.38-C| Massieve muur - Hydraulische Kalkmortel Comb. - Vochtgehalte - 14 dagen



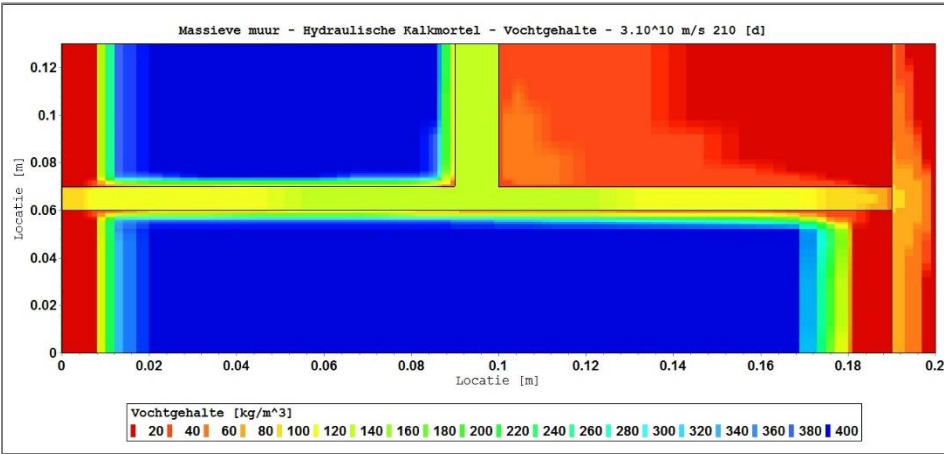
Figuur 10.38-D| Massieve muur - Hydraulische Kalkmortel Comb. - Vochtgehalte - 210 dagen

VOCHTGEHALTE MASSIEVE MUUR HYDRAULISCHE KALKMORTEL

(GELIJKE A_w)



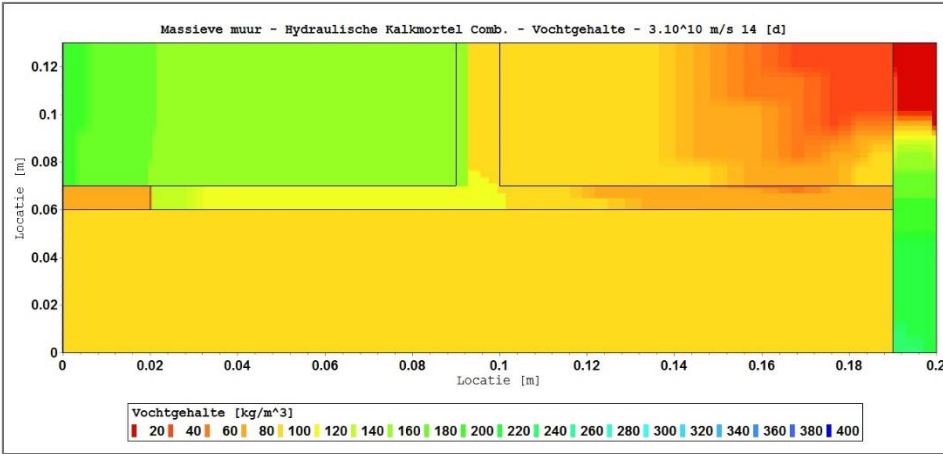
Figuur 10.39-A| Massieve muur - Hydraulische Kalkmortel - Vochtgehalte - 14 dagen



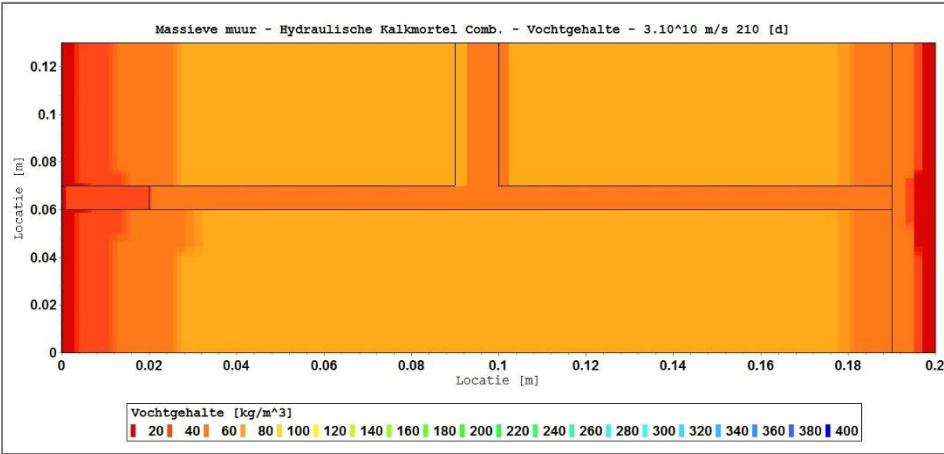
Figuur 10.39-B| Massieve muur - Hydraulische Kalkmortel - Vochtgehalte - 210 dagen

VOCHTGEHALTE MASSIEVE MUUR COMBINATIE HYDRAULISCHE KALKMORTEL

(GELIJKE A_w)



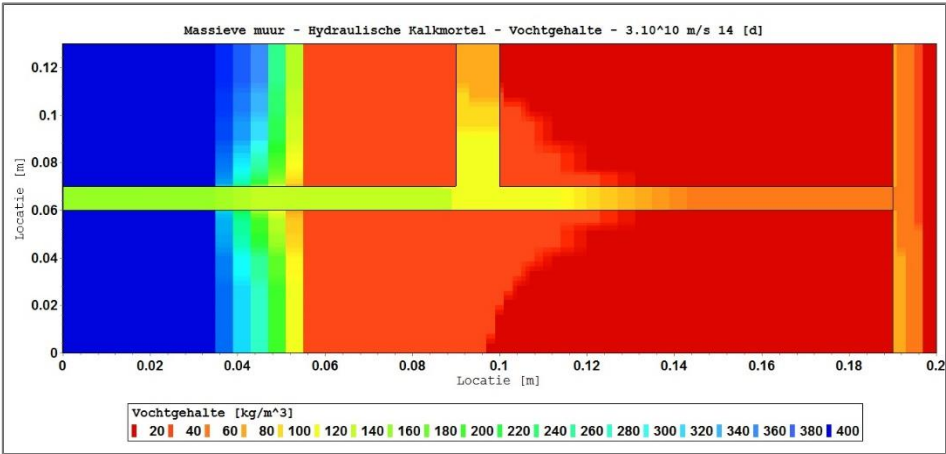
Figuur 10.39-C| Massieve muur - Hydraulische Kalkmortel Comb. - Vochtgehalte - 14 dagen



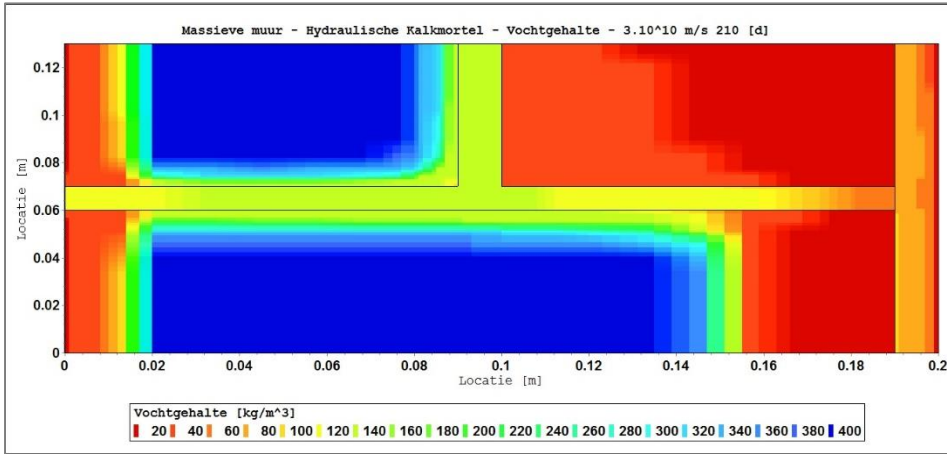
Figuur 10.39-D| Massieve muur - Hydraulische Kalkmortel Comb. - Vochtgehalte - 210 dagen

VOCHTGEHALTE MASSIEVE MUUR HYDRAULISCHE KALKMORTEL

(HOGERE A_w)



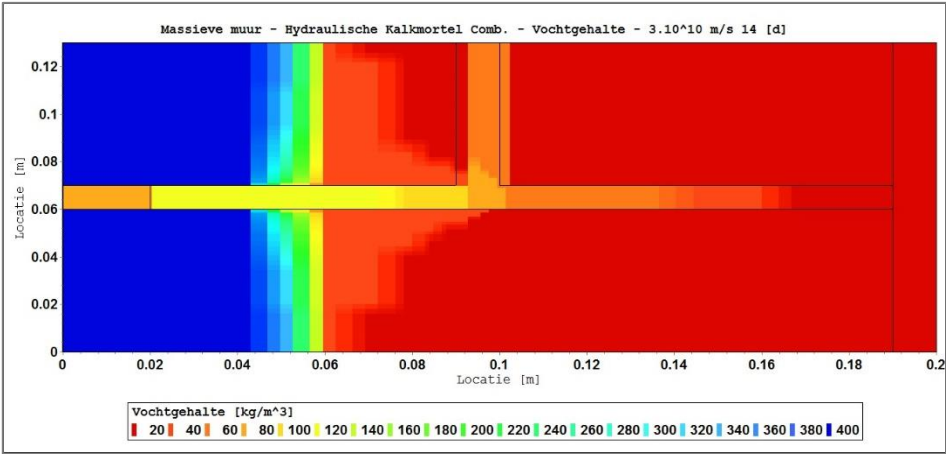
Figuur 10.40-A| Massieve muur - Hydraulische Kalkmortel - Vochtgehalte - 14 dagen



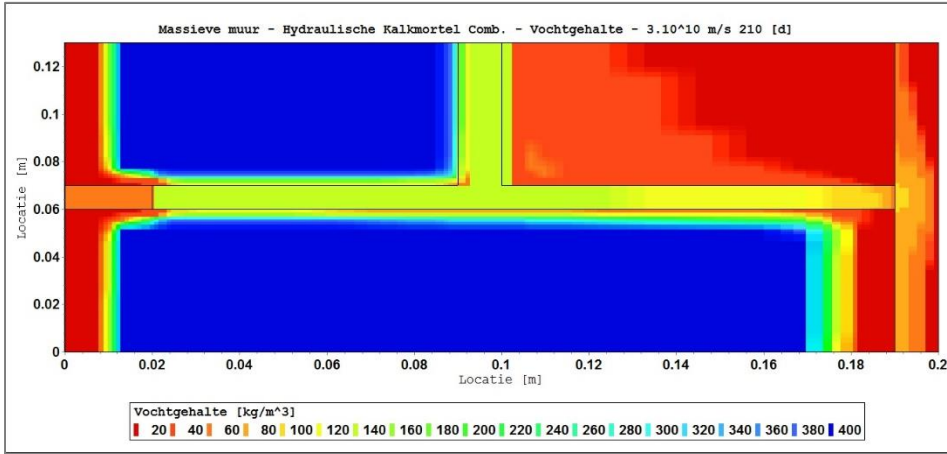
Figuur 10.40-B| Massieve muur - Hydraulische Kalkmortel - Vochtgehalte - 210 dagen

VOCHTGEHALTE MASSIEVE MUUR COMBINATIE HYDRAULISCHE KALKMORTEL

(HOGERE A_w)

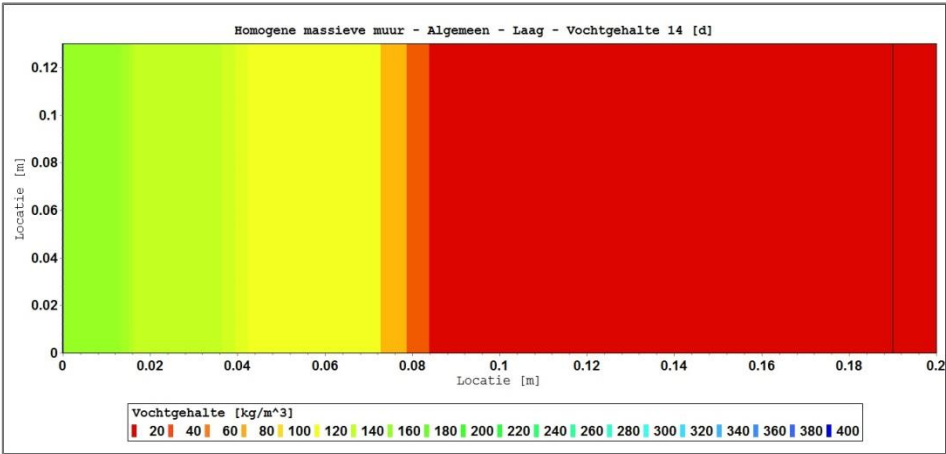


Figuur 10.40-C| Massieve muur - Hydraulische Kalkmortel Comb. - Vochtgehalte - 14 dagen

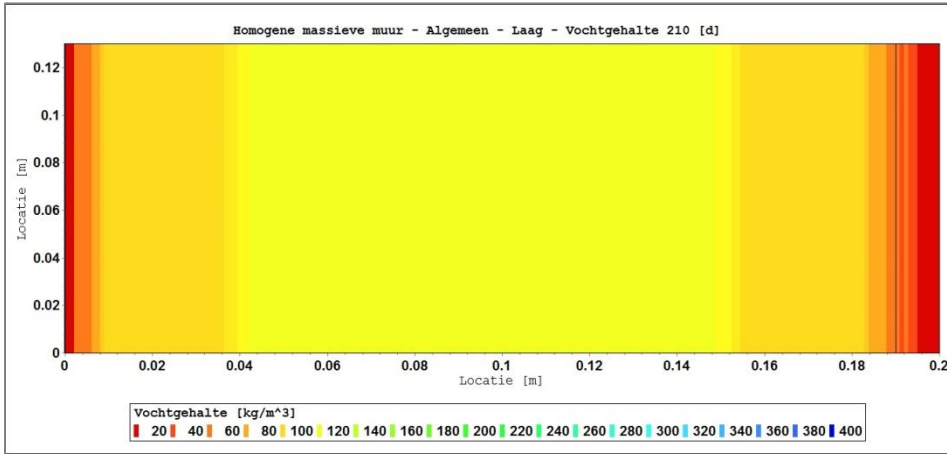


Figuur 10.40-D| Massieve muur - Hydraulische Kalkmortel Comb. - Vochtgehalte - 210 dagen

VOCHTGEHALTE HOMOGENE MASSIEVE MUUR ALGEMEEN LAAG A_w

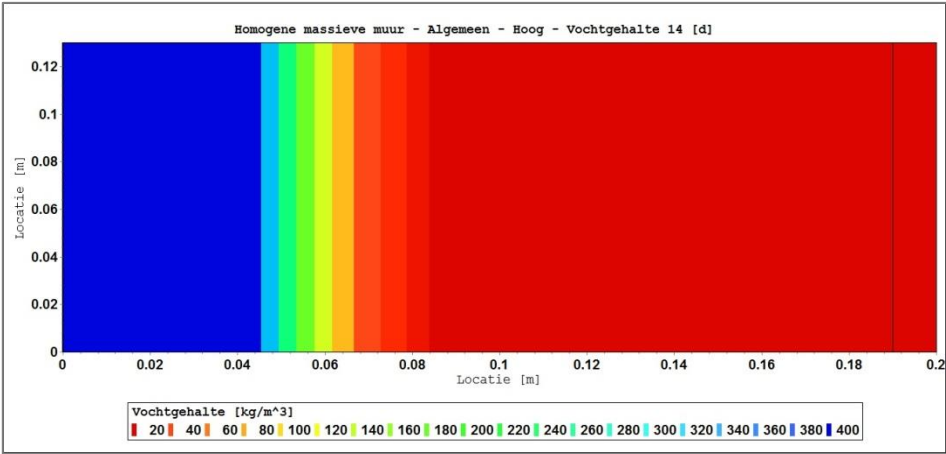


Figuur 10.41-A| Homogene Massieve muur - Algemeen laag - Vochtgehalte - 14 dagen

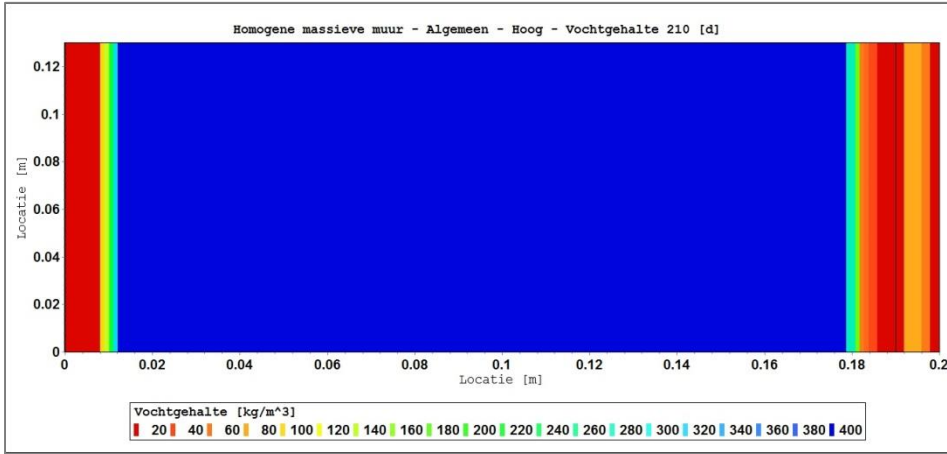


Figuur 10.41-B| Homogene Massieve muur - Algemeen laag - Vochtgehalte - 210 dagen

VOCHTGEHALTE HOMOGENE MASSIEVE MUUR ALGEMEEN HOGE A_w

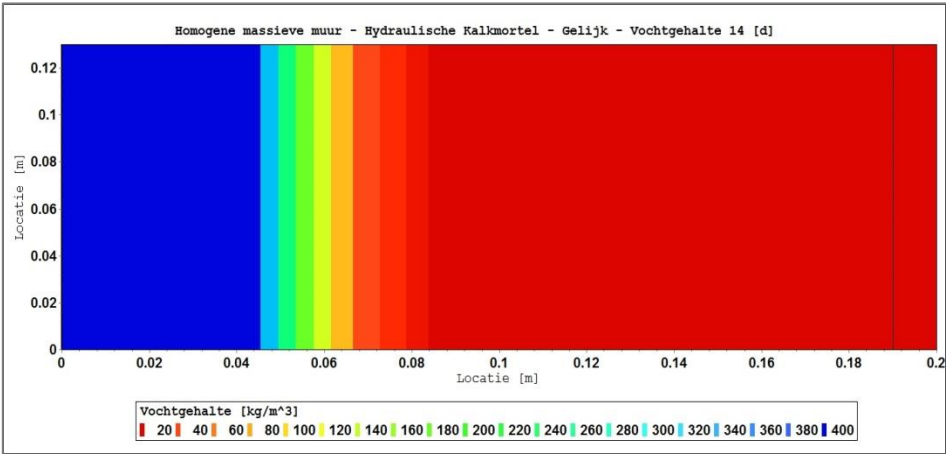


Figuur 10.41-C| Homogene Massieve muur - Algemeen hoog - Vochtgehalte - 14 dagen

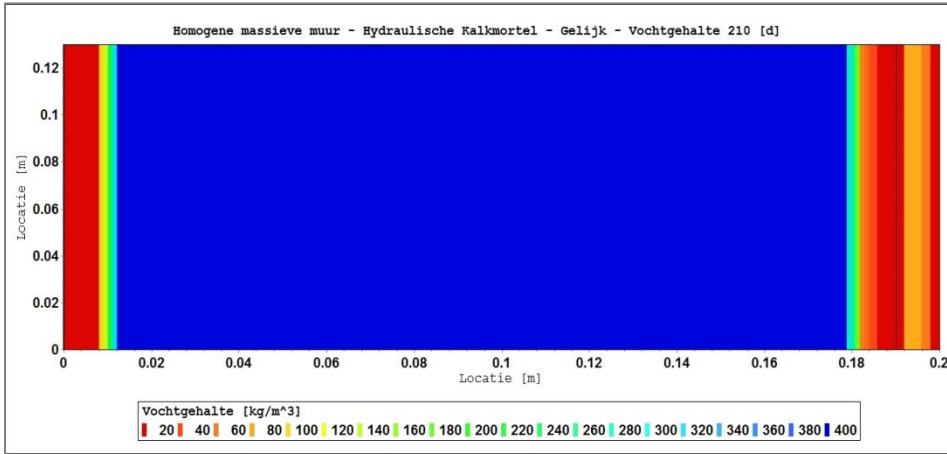


Figuur 10.41-D| Homogene Massieve muur - Algemeen hoog - Vochtgehalte - 210dagen

VOCHTGEHALTE HOMOGENE MASSIEVE MUUR GELIJKE A_w HYDRAULISCHE KALK

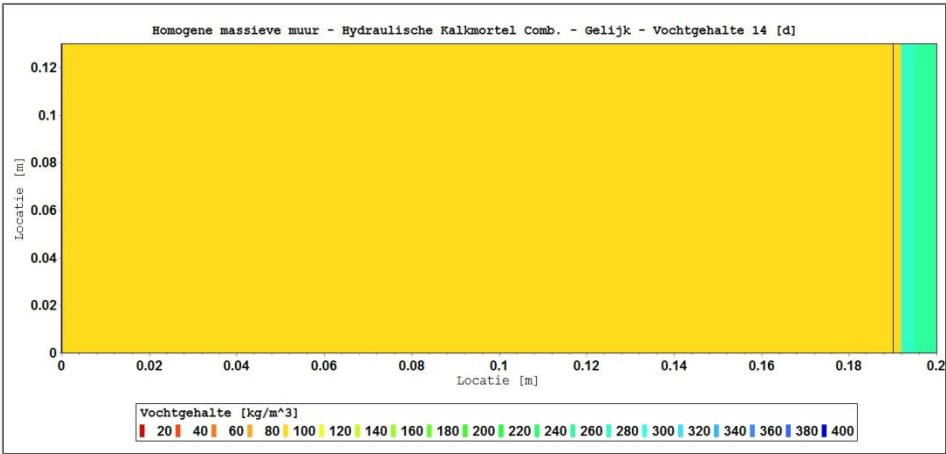


Figuur 10.42-A| Homogene Massieve muur - Gelijk Hy - Vochtgehalte - 14 dagen

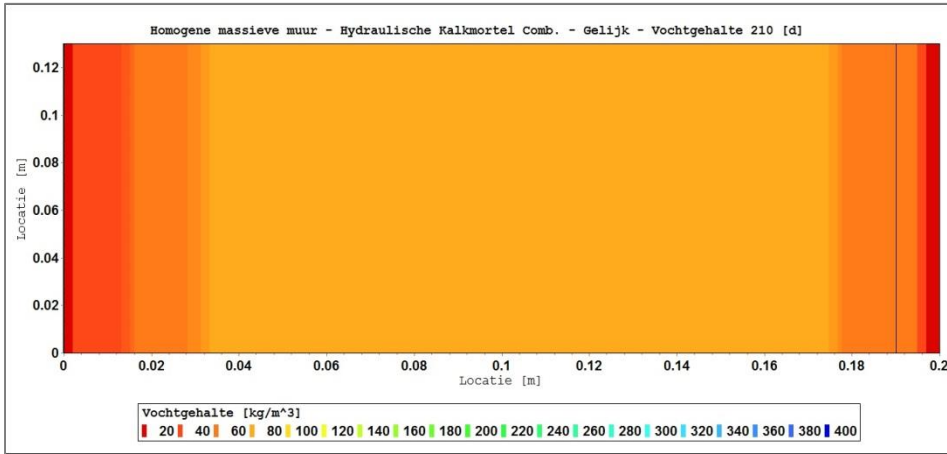


Figuur 10.42-B| Homogene Massieve muur - Gelijk Hy - Vochtgehalte - 210 dagen

VOCHTGEHALTE HOMOGENE MASSIEVE MUUR GELIJKE A_w HYDRAULISCHE KALK COMB.

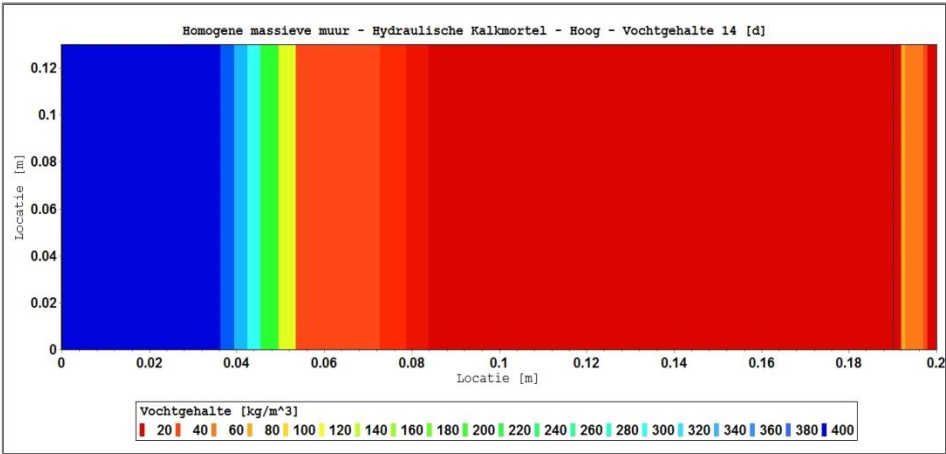


Figuur 10.42-C| Homogene Massieve muur - Gelijk HyC - Vochtgehalte - 14 dagen

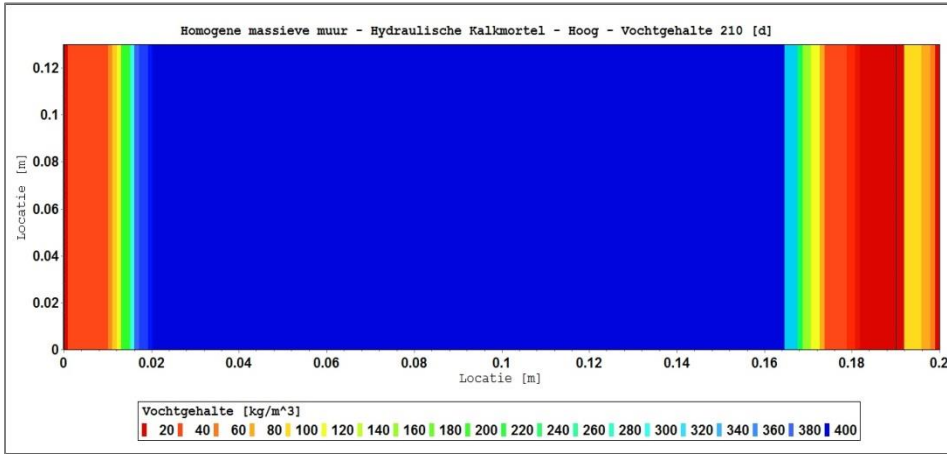


Figuur 10.42-D| Homogene Massieve muur - Gelijk HyC - Vochtgehalte - 210 dagen

VOCHTGEHALTE HOMOGENE MASSIEVE MUUR HOGE A_w HYDRAULISCHE KALK

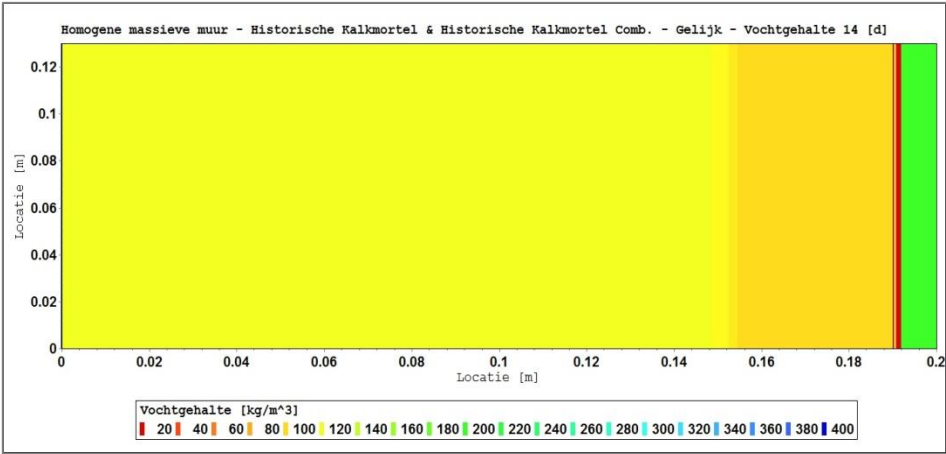


Figuur 10.43-A| Homogene Massieve muur - Hoog Hy - Vochtgehalte - 14 dagen

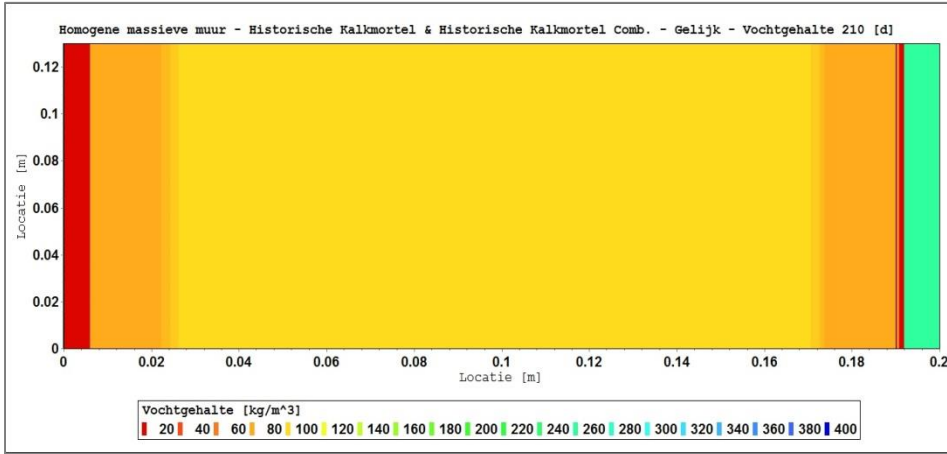


Figuur 10.43-B| Homogene Massieve muur - Hoog Hy - Vochtgehalte - 210 dagen

VOCHTGEHALTE HOMOGENE MASSIEVE MUUR GELIJKE A_w HISTORISCHE KALK / COMB.

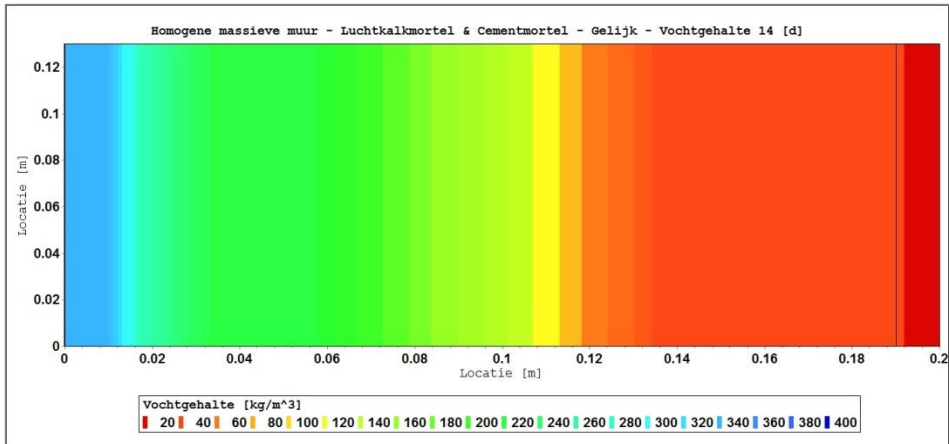


Figuur 10.44-A| Homogene Massieve muur - Gelijk Hi & HiC - Vochtgehalte - 14 dagen

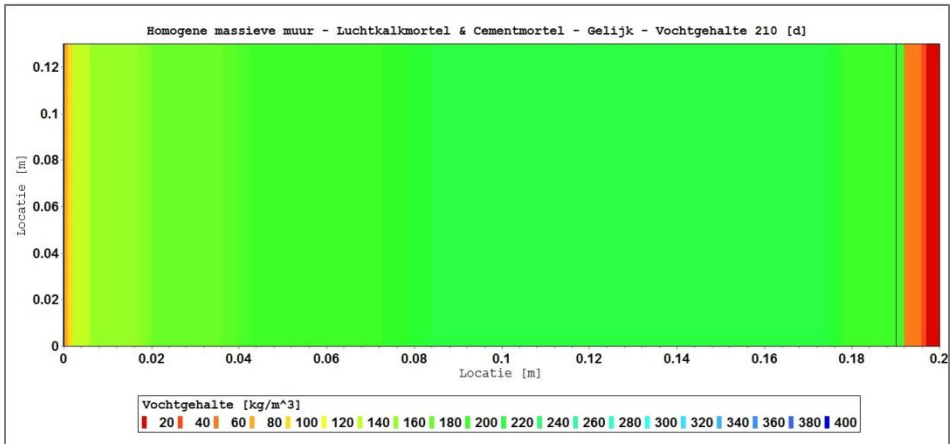


Figuur 10.44-B| Homogene Massieve muur - Gelijk Hi & HiC - Vochtgehalte - 210 dagen

VOCHTGEHALTE HOMOGENE MASSIEVE MUUR GELIJKE A_w LUCHTKALK- & CEMENTMORTEL

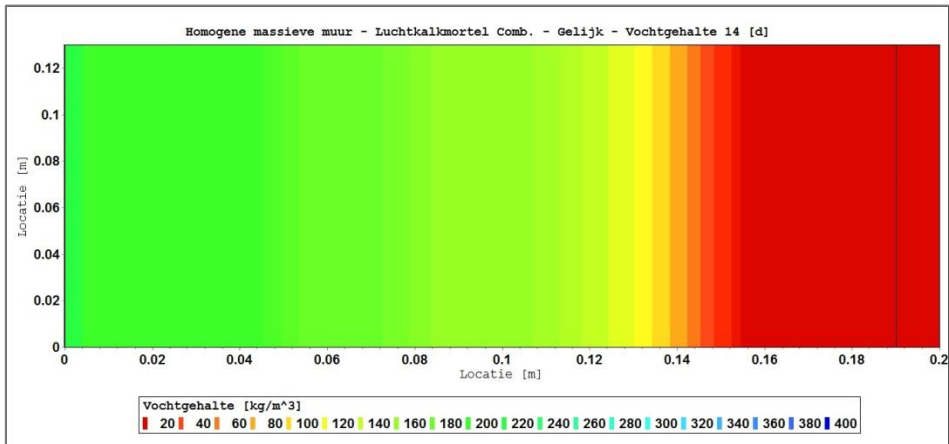


Figuur 10.45-A| Homogene Massieve muur - Gelijk Lu & C - Vochtgehalte - 14 dagen

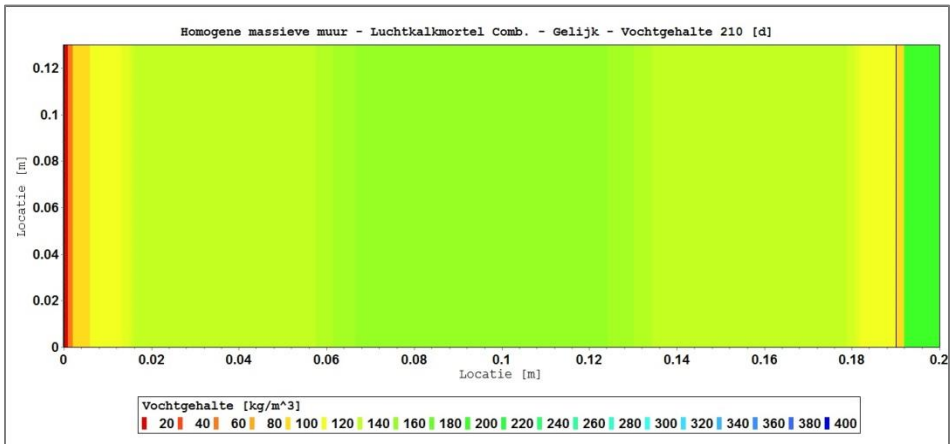


Figuur 10.45-B| Homogene Massieve muur - Gelijk Lu & C - Vochtgehalte - 210 dagen

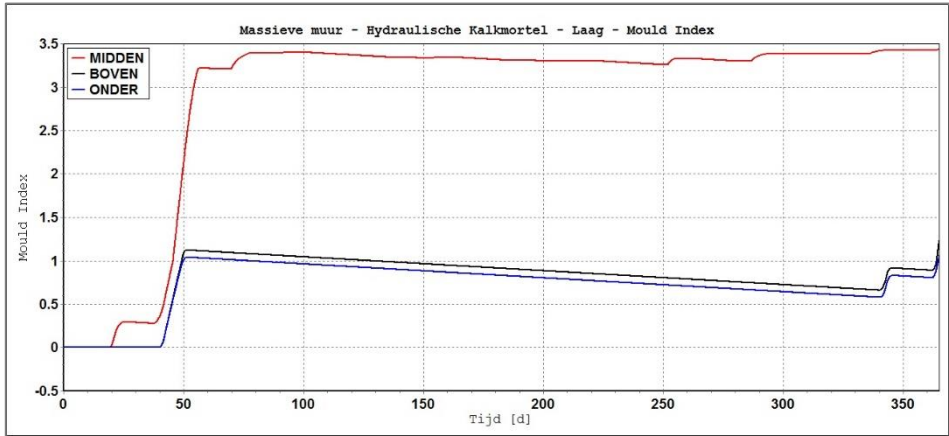
VOCHTGEHALTE HOMOGENE MASSIEVE MUUR GELIJKE A_w LUCHTKALKMORTEL COMB.



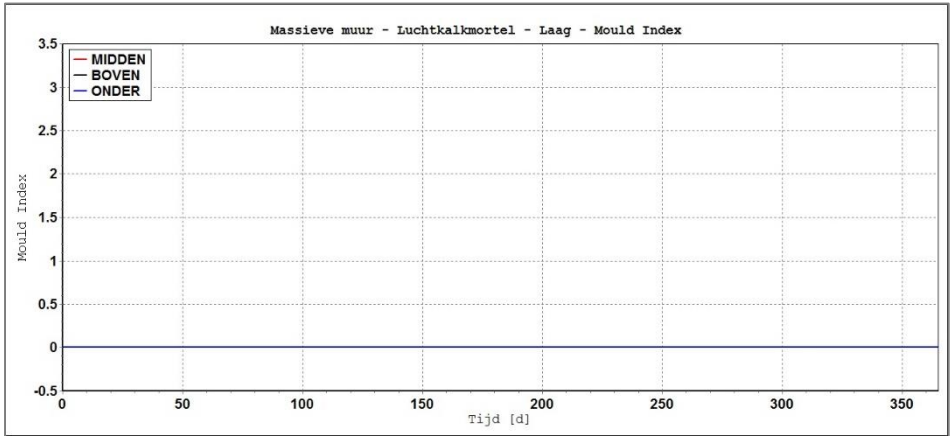
Figuur 10.45-C| Homogene Massieve muur - Gelijk LuC - Vochtgehalte - 14 dagen



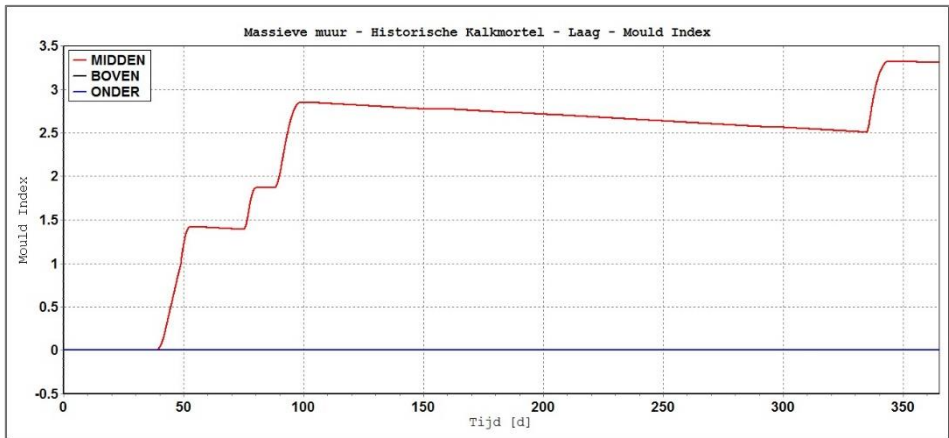
Figuur 10.45-D| Homogene Massieve muur - Gelijk LuC - Vochtgehalte - 210 dagen



Figuur 10.46-A| Massieve muur – Hydraulische Kalkmortel - Mould Index



Figuur 10.46-B| Massieve muur – Luchtkalkmortel - Mould Index



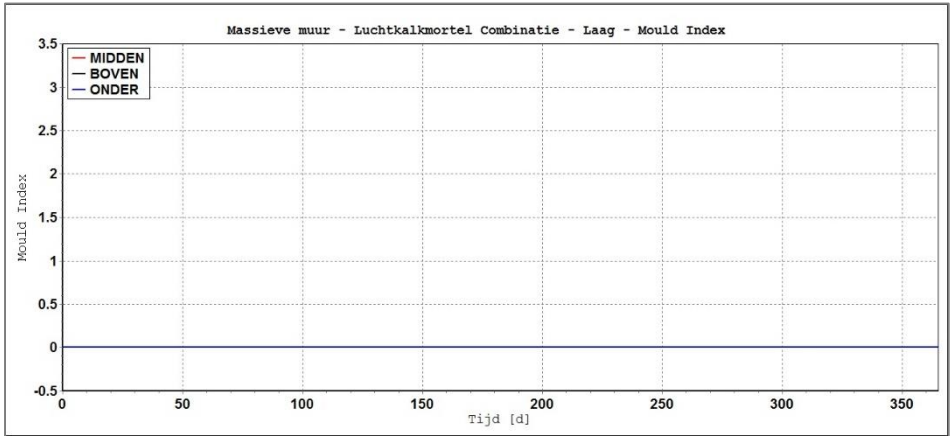
Figuur 10.46-C| Massieve muur – Historische Kalkmortel – Mould Index



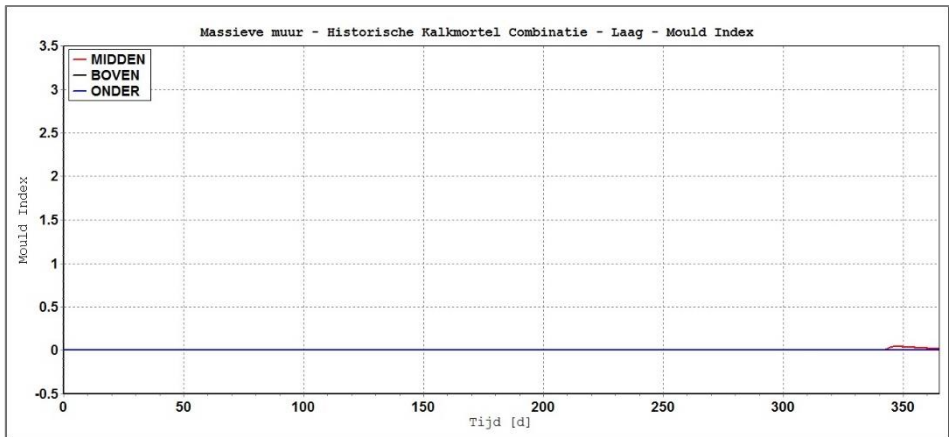
Figuur 10.46-D| Massieve Muur – Cementmortel - Mould Index



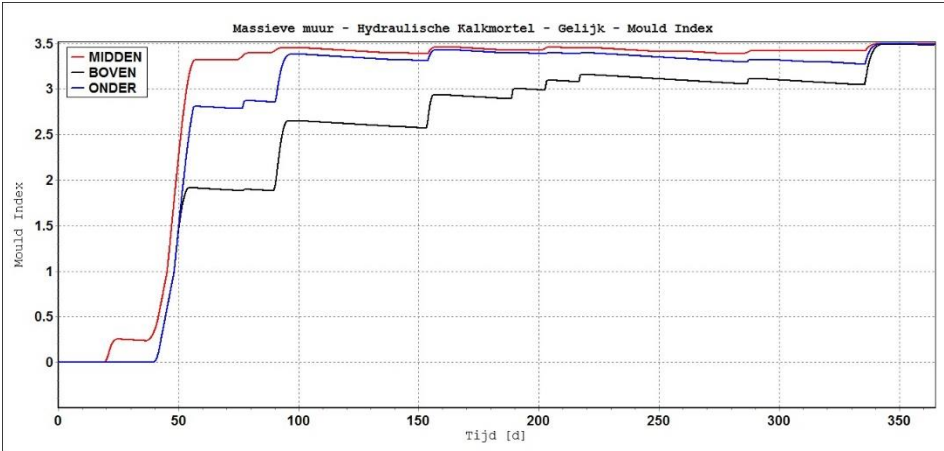
Figuur 10.47-A| Massieve muur – Hydraulische Kalkmortel Comb.- Mould Index



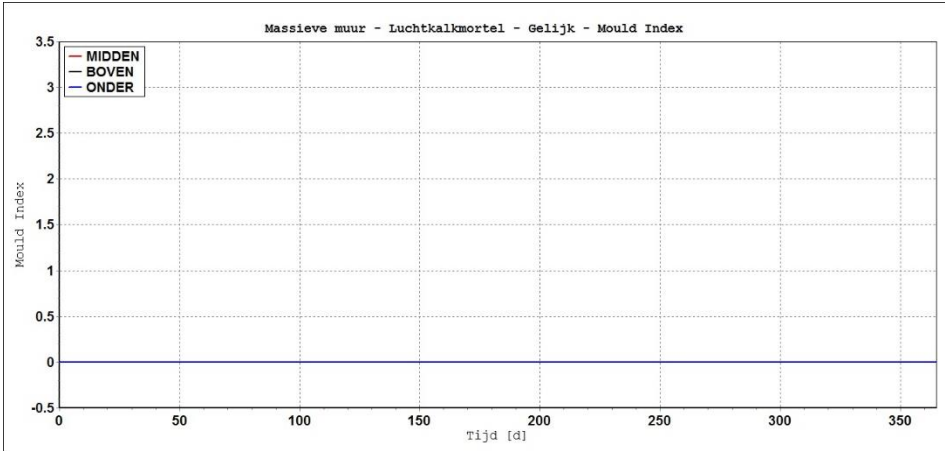
Figuur 10.47-B| Massieve muur – Luchtkalkmortel Comb.- Mould Index



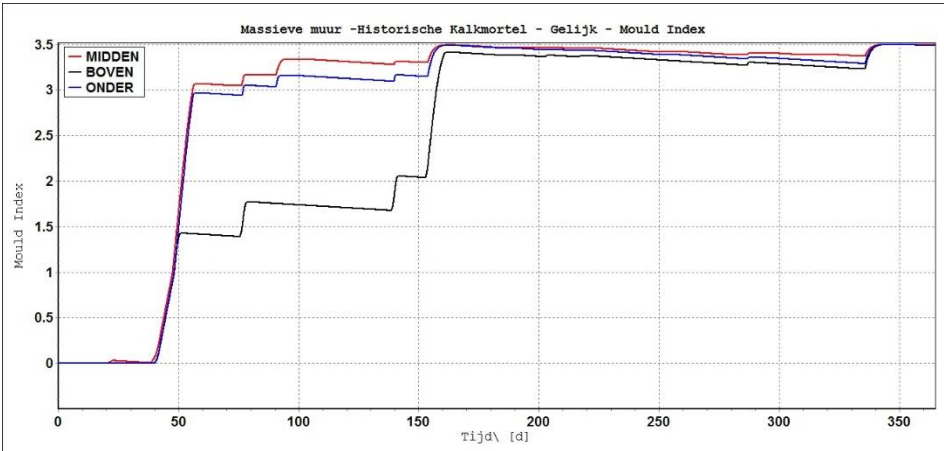
Figuur 10.47-C| Massieve muur – Historische Kalkmortel Comb. – Mould Index



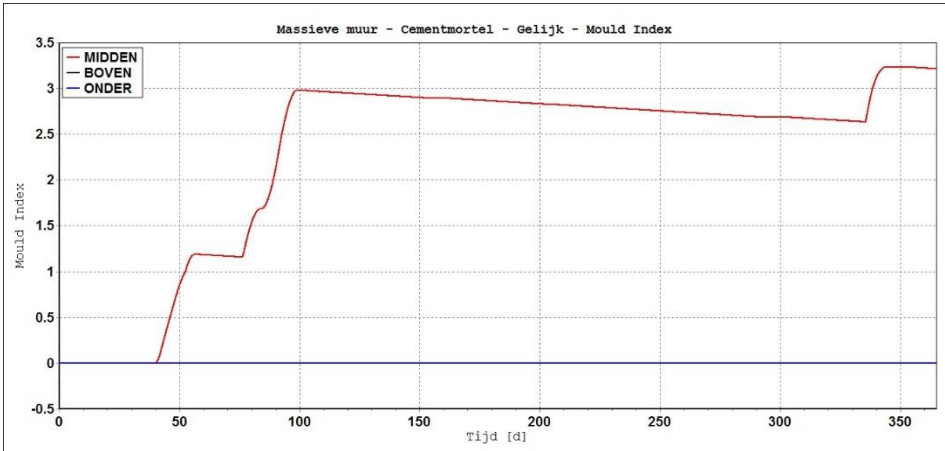
Figuur 10.48-A| Massieve muur – Hydraulische Kalkmortel - Mould Index



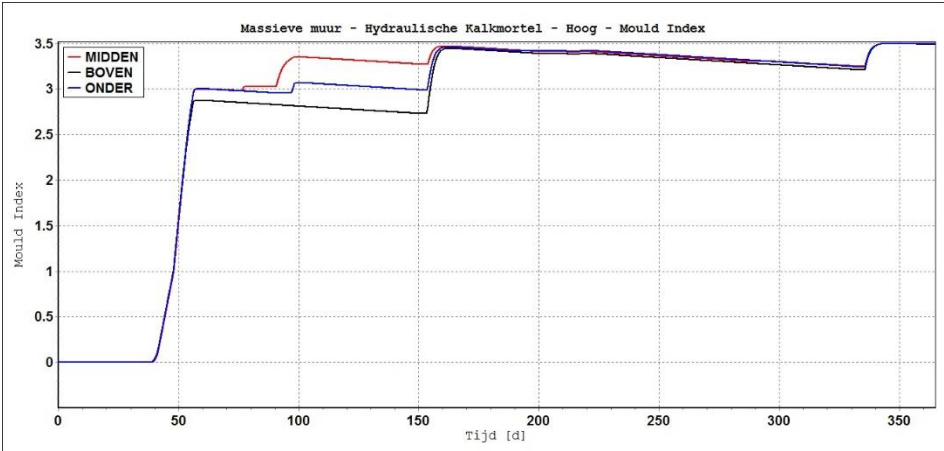
Figuur 10.48-B| Massieve muur – Luchtkalkmortel - Mould Index



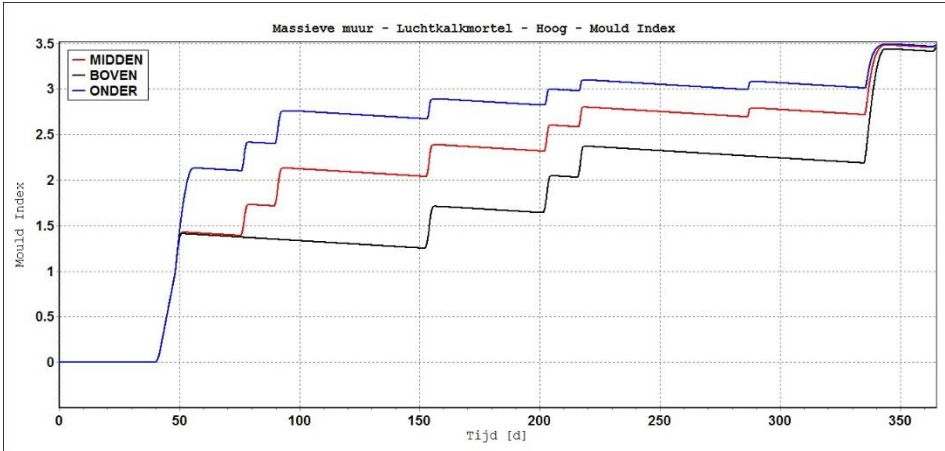
Figuur 10.48-C| Massieve muur – Historische Kalkmortel – Mould Index



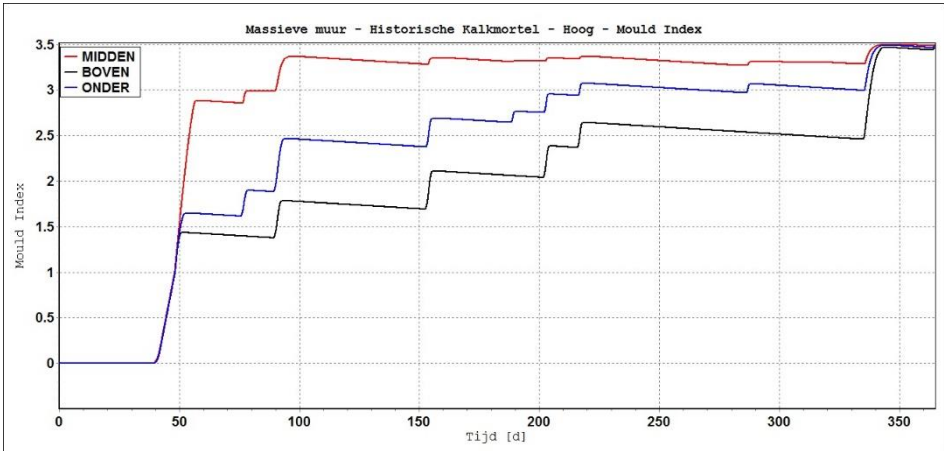
Figuur 10.48-D| Massieve Muur – Cementmortel - Mould Index



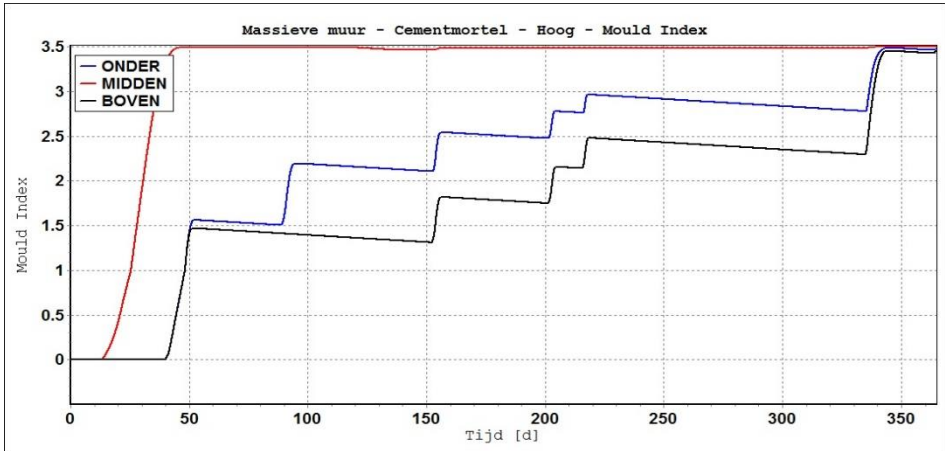
Figuur 10.49-A| Massieve muur – Hydraulische Kalkmortel - Mould Index



Figuur 10.49-B| Massieve muur – Luchtkalkmortel - Mould Index

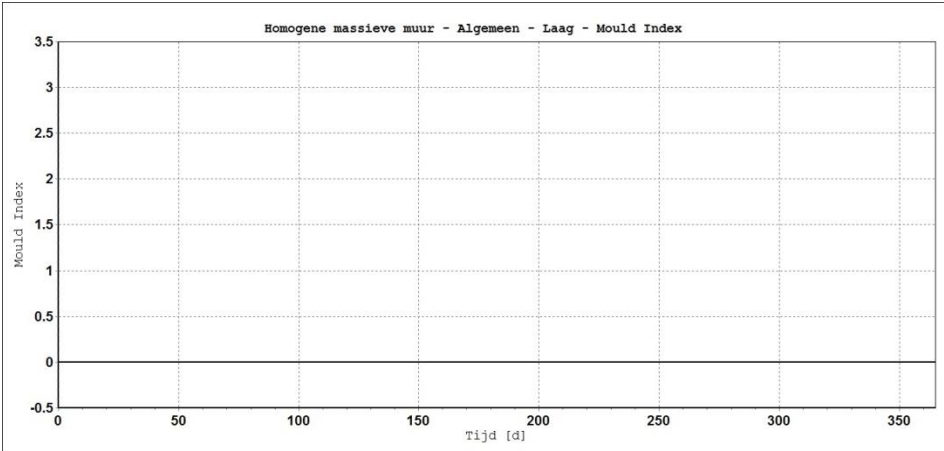


Figuur 10.49-C| Massieve muur – Historische Kalkmortel – Mould Index

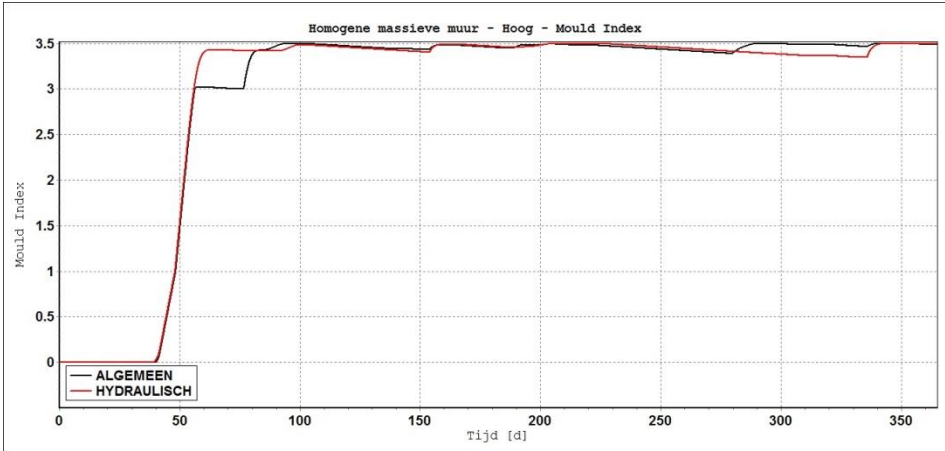


Figuur 10.49-D| Massieve Muur – Cementmortel - Mould Index

MOULD INDEX HOMOGENE MASSIEVE MUUR

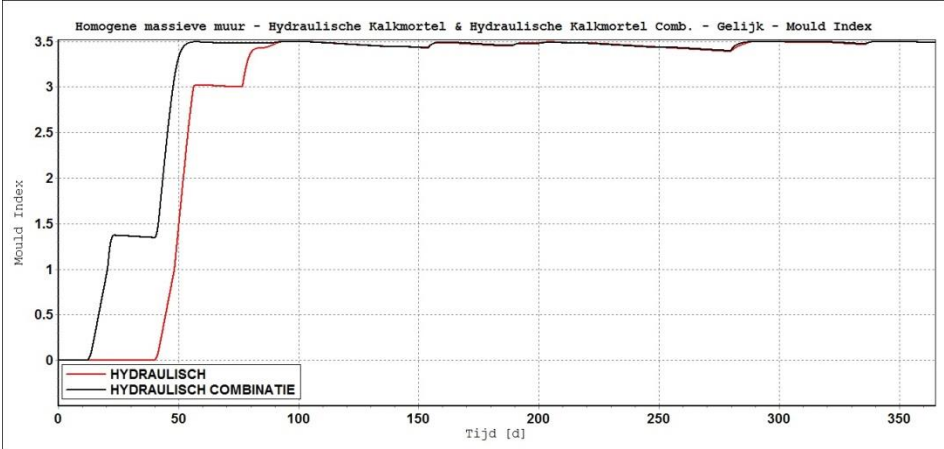


Figuur 10.50-A| Homogene Massieve muur - Algemeen laag – Mould Index

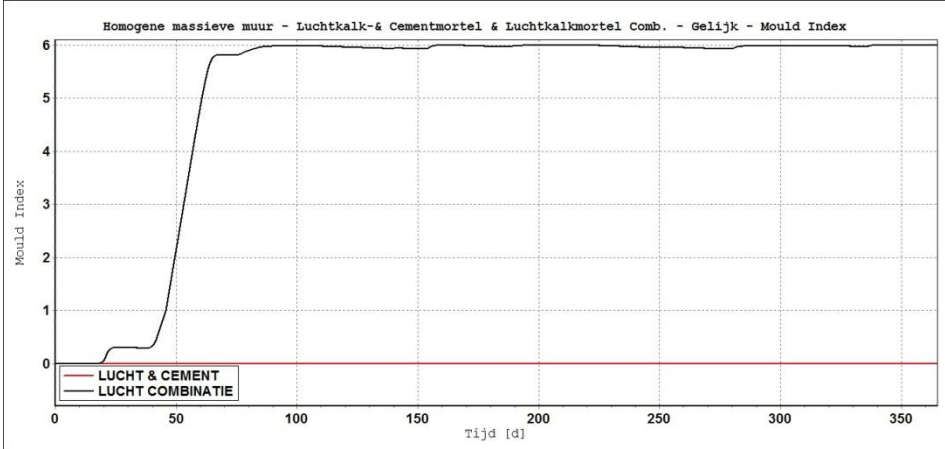


Figuur 10.50-B| Homogene Massieve muur - Algemeen hoog – Mould Index

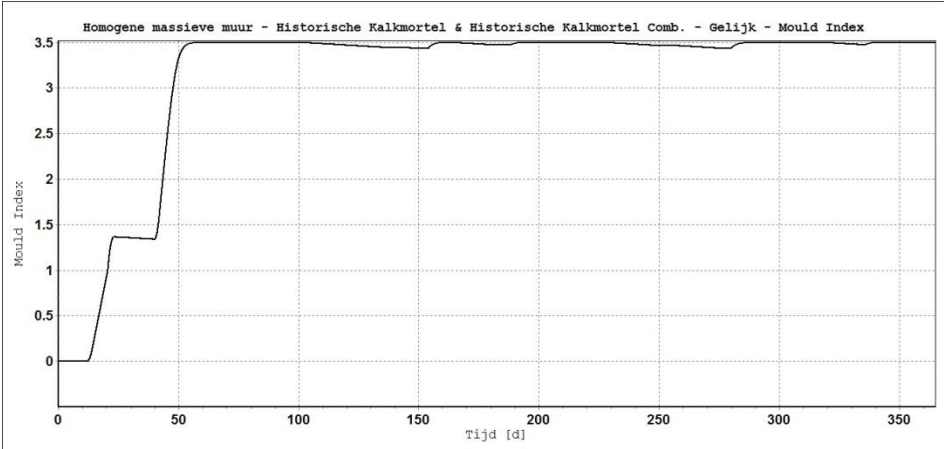
MOULD INDEX HOMOGENE MASSIEVE MUUR



Figuur 10.51-A| Homogene Massieve muur – Gelijk Hy & HyC – Mould Index



Figuur 10.51-B| Homogene Massieve muur – Gelijk Lu, C & LuC – Mould Index



Figuur 10.51-C| Homogene Massieve muur – Gelijk Hi & HiC – Mould Index

