

Simulatie van de vochtbelasting van houtvezelplaten in spouwmuren bij houtskeletbouw

Alexander Donche

Promotoren: prof. dr. ir. Michel De Paepe, prof. dr. ir. Arnold Janssens
Begeleider: Marnix Van Belleghem

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

Vakgroep Mechanica van Stroming, Warmte en Verbranding
Voorzitter: prof. dr. ir. Jan Vierendeels

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: prof. dr. Pieter Uyttenhove

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2011-2012



Overzicht

SIMULATIE VAN DE VOCHTBELASTING VAN HOUTVEZELPLATEN IN SPOUWMUREN BIJ HOUTSKELETBOUW

door
Alexander Donche
Academiejaar 2011-2012

Promotoren: Prof. dr. ir. M. De Paepe, Prof. dr. ir.-arch. A. Janssens
Begeleider: Ir. M. Van Belleghem
Vakgroepen: Vakgroep Mechanica van Stroming, Warmte en Verbranding
Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Voorzitters: prof. dr. ir. Jan Vierendeels
prof. dr. Pieter Uyttenhove

SAMENVATTING

In dit eindwerk wordt een hygrothermische evaluatie gemaakt van een spouwmuur opgebouwd uit een houtskelet. Hiervoor worden twee simulatie programma's gebruikt: een gekoppeld CFD/HAM-model en *WUFI-2D*.

In hoofdstuk 1 wordt het werkingsprincipe van een geventileerde spouwmuur geschetst en in hoofdstuk 2 wordt deze meer gedetailleerd en wetenschappelijke geanalyseerd aan de hand van de internationale literatuur.

Vanaf hoofdstuk 3 begint het werkelijke onderzoek. Hierbij worden in hoofdstuk 3 eerst de verschillen tussen *WUFI-2D* en het gekoppeld CFD/HAM-model onderzocht. In hoofdstuk 4 wordt de invloed van de randcondities op de luchtstromingen in een spouw onderzocht gevolgd door hoofdstuk 5 die de invloed van de langegolf straling tussen de twee spouwoppervlakken beoogt aan de hand van het gekoppeld CFD/HAM-model.

In hoofdstuk 6 wordt het model dat in *WUFI-2D* gebruikt wordt om een geventileerde spouw te simuleren gevalideerd. Hoofdstuk 7 combineert dan beide simulatieprogramma's om de vocht- en warmteoverdracht tussen spouwbladen te begroten.

In het laatste hoofdstuk worden de mogelijkheden van het gekoppelde CFD/HAM-model onderzocht waarna het wordt aangepast om net zoals in *WUFI-2D* het mogelijk te maken variabele randcondities op te leggen en te simuleren over een langere periode.

TREFWOORDEN

CFD, WUFI, geventileerd, spouwmuur

SIMULATION OF THE MOISTURE LOAD ON WOOD FIBERBOARDS IN CAVITY WALLS MADE OF TIMBER FRAMES

Alexander Donche

Supervisors: Van Belleghem M., Janssens A., De Paepe M.

ABSTRACT

This study makes use of two simulation programs to predict the moisture load on wood fiberboards in cavity walls made of timber frames. One is a coupled CFD/HAM-model and the other is WUFI-2D.

KEYWORDS

CFD, WUFI, ventilation, cavity wall

INTRODUCTION

To predict the risk of mould in ventilated air cavities, an accurate simulation model is important. Instead of experiments, in the last decades the use of commercial CFD-software increased in the construction industry. Most of the commercial CFD-programs do not implement the transfer of vapour through the air and in porous materials. In [1] a coupled CFD/HAM-model is developed to predict the moisture damage in constructions. This model uses the commercial CFD program Fluent® to solve the Navier-Stokes equations in the air. An extra set of equations was added to the model to solve the heat and moisture transport in hygroscopic porous materials as well. This model only uses the vapour transport equations and not the transport equations for liquid. Because of the long calculation time of such simulation models, simplified HAM-models are often used in the construction industry to predict mould risk. These models use some simplifications to reduce the calculation time.

METHODOLOGY

For the simulations in the coupled CFD/HAM-model and WUFI-2D the next cavity configuration is used, from interior (i) to exterior (e) [Figure 1]: 10 mm gypsum, 100 mm mineral wool, 10 mm Celit-plate, 50 mm air cavity and a 100 mm masonry outer layer.

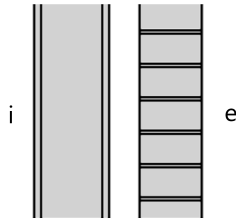


Figure 1 Configuration of the cavity wall.

The heat and mass transfer coefficients are:

Table 1: Heat and mass transfer coefficients

	Interior	Exterior
α	8	23
β	$\alpha_i \cdot 7 \cdot 10^{-9}$	$\alpha_e \cdot 7 \cdot 10^{-9}$

The cavity is a storey high (250 cm). The air velocity (v) at the inlet of the cavity is 0.2 m/s. Measurements show this is a common velocity in such cavity configuration with that cavity depth [2, 3]. For the simulations in the coupled CFD/HAM-model the grid is made in Gambit®. The grid density is defined after a Richardson extrapolation. The grid density has an error band of less than 1% for the velocity, the heatflux and the massflux. The total amount of cells for the grid is 95000 (190X500). This grid was used for these simulations. The grid

density is larger at the interface between two different material layers or between a material layer and an air layer than in the center of the material or air layer. A pressure outlet is used for the outlet.

RESULTS AND DISCUSSION

Comparison of the transport equations in both simulation programs

WUFI-2D uses some simplifications for the boundary conditions, but also in the transport equations. WUFI do not take in account the heat capacity of vapour. In chapter 3, an overview of the differences between both simulation and the constraints programs is given.

Heat and mass transfer coefficients at the cavity surfaces

The boundary layers at the cavity surfaces develop over the height of the cavity. Low inlet velocity and relatively large temperature gradients result in mixed convection in the cavity. The local velocity is influenced by the buoyancy forces and defines the thickness of the boundary layer. The thickness of the boundary layer in turn defines the local heat and mass transfer. The thicker the boundary layer, the more difficult the heat and moisture transfer.

First the heat/mass-analogy is examined for mixed convection in a cavity with equal boundary conditions (temperature and mass fraction) for the inner and the outer layer. Secondly a cavity with different boundary conditions for both layers will be examined. To reduce the calculation time, a steady state simulation is made with a constant Θ and Y on each cavity layer.

The heat and mass transfer coefficients are defined by:

$$\alpha = \frac{q}{(T_s - T_{inlet})} \quad \text{and} \quad \beta = \frac{g}{(p_{v,s} - p_{v,inlet})}, \quad \text{with } T_s \text{ and } p_{v,s} \text{ the local}$$

surface temperature and the local surface vapour pressure and T_{inlet} and $p_{v,inlet}$ the constant inlet temperature and constant vapour pressure of the cavity.

For equal boundary conditions (constant Θ and Y) on both layers, the heat and mass transfer coefficients are identical on both cavity surfaces. For different boundary conditions on both layers, the heat and mass transfer coefficients are different at both. This can be explained by the asymmetric flow in the cavity caused by buoyancy. Near the hot wall the air will rise faster than near the colder wall, since hot air is less dense than cold air. Humid air is also less dense than dry air since the molar weight of water molecules is less than that of air. The temperature difference has the biggest influence on the buoyancy forces and the local velocity and just a small influence is a result of the increase of the RH. The local higher velocity at the hot and humid surface caused by buoyancy results in a higher heat and mass transfer coefficient.

For equal boundary conditions on both layers, the heat/mass-analogy ($\frac{\beta}{\alpha} = C' = 7E-9$) still counts as a result of the large local

velocities at the boundaries and because of that large local velocity, a small increase of the humidity and temperature of the air in the cavity. For different boundary conditions on the other hand, the heat/mass-analogy counts at lower heights in the cavity, but not higher in the cavity. That's a possible result of the increase of the humidity and temperature of the air higher in the cavity and the use of a constant inlet temperature and vapour pressure and also because of the

development of the profile of the velocity over the height of the cavity. The main reason is the lower velocity on the colder cavity wall (L), because on the colder cavity wall the natural convection dominates the forced convection. Thus in a vertical cavity, the heat/mass-analogy does not counts at all when the local velocity is too small as a result of natural convection or a low inlet velocity.

Long-wave radiation in the cavity

The analysis in the previous paragraph neglected the influence of radiation heat exchange in the cavity. However, at large temperature differences between both walls, this influence is significant. When long-wave radiation is taken into account the temperature on the cavity surface of the Celit-plate becomes equal to that of the masonry layer. The effect of the long-wave radiation in cavities is important to make a good prediction for the mould risk, because a change in temperature results in a change in relative humidity. At higher velocities on the other hand, the long-wave radiation will be less important because the relative amount of convective heat transfer will be larger than the amount of long-wave radiation heat transfer.

Ventilated cavity walls in WUFI-2D®

The previous section shows that in reality the temperatures at both sides of the cavity equalize. As a result of the equal temperatures, the heat and mass transfer coefficients are approximately equal on both surfaces of the cavity layers. Because of this WUFI [4] uses a λ_{eff} - and a μ_{eff} -value for the air layer, measured in a case of only natural convection. The λ_{eff} -value combines conduction, convection and long-wave radiation. The μ_{eff} -value combines diffusion and convection.

To simulate the effect of ventilation, WUFI adds an extra heat and moisture source at the air layer, depending on the expected air change ratio (ACR). The bigger the ACR, the bigger the heat and moisture source, linked to the in- or outdoor conditions [4]:

$$S_h = h_v \nabla g_v + ACR \cdot \rho \cdot (h_e - h_{\text{cav}})$$

$$S_w = ACR \cdot (\rho_{v,e} - \rho_{v,\text{cav}})$$

To check if the approach WUFI makes is reasonable, an identical simulation in WUFI-2D and the coupled CFD/HAM-model is compared. In the WUFI simulations, there is initially an over-estimation of the increase identified. As a result of the temperature difference between both cavity layers, the profile of the velocity redistributes. On the colder surface the velocity due to natural convection has an opposite direction compared to the velocity due to forced convection. The total velocity near the Celit is the superposition of both velocities. This means that the total velocity is locally smaller near the Celit. WUFI does not take that in account. As a result the convective transfer predicted in WUFI near the Celit will be higher than that predicted by the coupled CFD/HAM model. This means that the approach proposed in WUFI is only valid when the temperatures on both sides of the cavity are equal. A more extensive explanation can be found in chapter 6.

Influence of a cavity layer with a high relative humidity

The long-wave radiation between the cavity layers is the most important to transfer heat. To define the effect of a humid outer layer on a less humid inner layer the coupled CFD/HAM-model will be used to simulate a case [Table 2].

Table 2: Initial conditions

	Inner layer	Inlet cavity	Outer Layer
Θ	20	20	20
RH	51	50	80

With an equal initial temperature over the cavity wall, one can see that RH decreased less at 2 m (2) than at 1 m (1) in the Celit-plate [Figure 2].

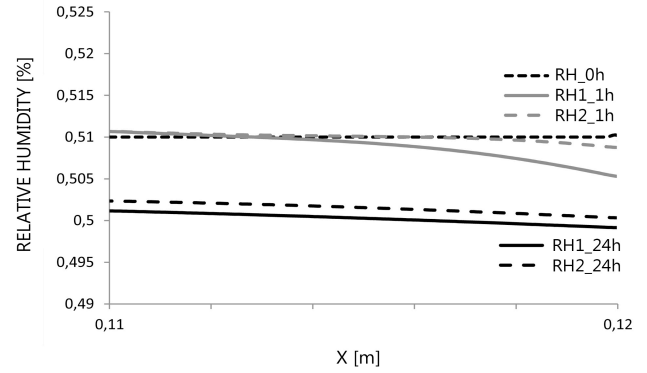


Figure 2: Influence of the masonry wall on the local RH in the Celit-plate (x=0,11:insulation side and x=0,12:cavity side).

At lower heights in the cavity, the boundary layer at the brick side is thinner (developing boundary layer), so the drying of the cavity layer is bigger. Higher in the cavity the boundary layer is thicker, so the drying of the cavity layers is smaller. Overall however, the influence is limited. After one hour, the RH at the cavity surface of the inner layer (at x=0.12m) decreases. This means that after a while the influence decrease and the RH in the Celit-plate becomes the same as the inlet conditions.

The reason for the bigger initial influence is because of the higher initial RH at the cavity surface of the brick. When the brick is drying out, the RH in the air layer at the brick side will be smaller, so the influence will be smaller. If the RH of the brick wall should by constantly 80%, the influence on the inner layer is greater after 24h.

If the initial RH of the outer layer increases from 80% to 100%, for example because of an intense rain shower, the influence can be greater. The problem is that the coupled CFD/HAM-model only simulates vapour transport and no liquid transport, so simulations with humidity near 100% are not possible with the current model. Therefore WUFI-2D can be used to examine the difference in drying behaviour between difference materials.

Gypsum conserves longer his RV round 100%, than the other materials. At a RH round 100%, gypsum loses its strength and stiffness and is therefore not interesting to use as outer layer. OSB conserves longer his RH round 100% at the surface compared to masonry. That is a result of the combination of:

- The sorption-isotherm
- The moisture permeability
- w_{sat}

An outer layer built up of a material with a high w_{sat} and high moisture permeability holds longer a RH of 100% at the surface and has, for that reason, a bigger influence on the inner layer. Also the thickness of the layer and the boundary conditions outside will influence the drying of the layer.

Because of the good results of the WUFI model to simulate ventilated cavities, WUFI is used to simulate a year. The difference between an outer layer with and without rainwater absorption is analysed. In the winter, this results in a different RH in the Celit, but not in summer. That's because in summer, the outer layer dries out at the cavity surface and the influence becomes smaller. So in summer, the RH of the ventilated air determines the RH of the Celit.

Realistic simulations in the coupled CFD/HAM-model

In the last chapter, the coupled CFD/HAM-model is adapted to make it possible to simulate with variable boundary conditions and for

a period of a week. To show the possibilities of the coupled CFD/HAM-model some simulations were made to study the difference between Celit and OSB as protection of the insulation. In our climate, Celit gives better results to decrease the mould growth risk and the heat losses.

CONCLUSION

For the simulation of ventilated cavity walls, the effect of the long-wave radiation in the cavity cannot be ignored. The effect of the long-wave radiation results in more equal temperatures on both surfaces of the cavity layers. This is a result of an extra heat exchange between the surfaces of the cavity layers. This phenomenon of equal temperatures results in a specific approach in WUFI-2D to simulate ventilated air cavities. If the temperature is however not equal, the approach in WUFI-2D makes an over-estimation of the heat and mass transfer on the colder cavity layer.

As a result of the equal temperatures on the surfaces of both cavity layers, there will be no influence of the boundary layer of temperature of the outer cavity layer on the inner. There are however differences in relative humidity between both cavity layers. The outer layer has indeed an influence on the inner cavity layer. The size of influence depends on the initial moisture content, the sorption-isotherm and the moisture permeability of the outer cavity layer. When there are temperature differences between the cavity layers also the heat capacity and the λ -value of both cavity layers is important, because a change of the temperature results in a change of the relative humidity.

The numerous influence parameters illustrate the importance of good simulation software that contains the vapour and liquid transport equations for porous materials.

REFERENCES

- [1] Hendrik-Jan Steeman, *Coupled simulation of heat and moisture transport in air and porous materials for the assessment of moisture related damage*, Building and Environment, Vol. 44, 2009, pp. 2176-2184
- [2] John Straube, *Moisture Control and Enclosure Wall Systems*, University of Waterloo, 2009
- [3] A. Janssens, *IWT VLIET/930235 tweede jaarrapport, DEEL 3: ZINKEN DAKEN*, 1997
- [4] Achilles N. Karagiozis and Hartwig M. Kunzel, *The Effect of Air Cavity Convection on the Wetting and Drying Behavior of Wood-Frame Walls Using a Multi-Physics Approach*, Journal of ASTM International, Vol. 6, No. 10, 2009

Toelating tot bruikleen

De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de scriptie te kopiëren voor persoonlijk gebruik.

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

The author gives permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use.

In the case of any other use, the limitations of the copyright have to be respected, in particular with regard to the obligation to state expressly the source when quoting results from this master dissertation.

Alexander Donche, juni 2012

Voorwoord

Deze masterproef kon enkel tot stand komen dankzij de steun van heel wat personen, die ik hierbij wil bedanken.

Allereerst wens ik mijn promotoren Prof. dr. ir. M. De Paepe en Prof. dr. ir.-arch. A. Janssens te bedanken voor het aanbieden van dit interessante onderzoeksonderwerp en voor hun enthousiaste begeleiding.

Speciale dank gaat uit naar ir. Marnix Van Belleghem voor de uitgebreide begeleiding van mijn eindwerk. Bij hem kon ik steeds terecht voor al mijn vragen en problemen tijdens het afgelopen thesisjaar.

Voor meer informatie over de verschillende HAM-modellen en de mogelijkheden ervan kon ik me altijd richten tot Jonas Eykens van *Isoproc*.

Tenslotte wens ik ook mijn vrienden en familie te bedanken voor hun oprechte steun gedurende het voorbij jaar.

Nomenclatuur

A	waterabsorptie-coëfficiënt	$[kg/(m^2 s^{0,5})]$
a	absorptiefactor	$[-]$
b	breedte	$[m]$
C	luchtdoorlatendheid coëfficiënt	$[kg/(m^2 s Pa^n)]$
C	warmtecapaciteit	$[J/kg.K]$
d	dikte	$[m]$
E	specifiek energie	$[J/kg]$
F	hoekfactor	$[-]$
g	vochtflux	$[kg/m^2]$
h	enthalpie	$[J/kg]$
K	transportcoëfficiënt	$[s]$
Le	Lewis-factor	$[-]$
L	latente warmte	$[J/kg.K]$
M	molaire massa	$[g/mol]$
Nu	Nusselt-getal	$[-]$
n	lucht permeantie	$[kg/(m^2.s.Pa)]$
Pr	Prandtl-getal	$[-]$
p	druk	$[Pa]$
Q	warmtebron/ -put	$[J/m^3 s]$
q	warmteflux	$[W/m^2]$
Sc	Schmidt-getal	$[-]$
T	temperatuur	$[K]$
t	tijd	$[s]$
v	snelheid	$[m/s]$
w	vochtgehalte	$[kg/m^3]$
Y	massafractie	$[kg/kg]$

Griekse symbolen

α	warmteovergangscoefficiënt	$[W/m^2K]$
β	massaovergangscoefficiënt	$[s/m]$
ϵ	emissiefactor	$[-]$
λ	warmtegeleidingscoëfficiënt	$[W/mK]$
μ	diffusieweerstandsgetal	$[-]$
ω	hoek	$[graden]$
ϕ	universele porositeit	$[-]$
$\Re$	gasconstante	$[J/kgK]$
ρ	massadichtheid	$[kg/m^3]$
Θ	Celsius temperatuur	$[^{\circ}C]$
φ	relatieve vochtigheid	$[%]$

Subscripts

a	air (lucht)
c	convection (convectie)
c	cold (koud)
cav	cavity (spouw)
e	exterior (buiten)
h	hot (warm)
i	interior (binnen)
$inlet$	inlet (inlaat)
l	liquid (vloeistof/fluidum)
m	mass (massa)
r	radiation (straling)
ref	referentie
s	surface (oppervlak)
sat	saturation (saturatie)
sky	sky (hemelkoepel)
v	vapour (damp)

Afkortingen

CFD	Computational Fluid Dynamics
HAM	Heat, Air and Moisture
UDF	User-Defined Function
WUFI	Wärme Und Feuchte Instationär

Inhoudsopgave

Overzicht	i
Extended abstract	iii
Toelating tot bruikleen	vi
Voorwoord	vii
Nomenclatuur	viii
1 Introductie	1
1.1 Achtergrond	1
1.1.1 Vloeibaar vocht als vochtbron	2
1.1.2 Vochtige lucht (waterdamp) als vochtbron	4
1.2 Principiële werking van de spouwmuur	6
1.2.1 Massatransport	6
1.2.2 Warmtetransport	9
1.3 Inzichten	9
2 Literatuurstudie	10
2.1 Warmtetransport	10
2.1.1 Geleiding, convectie en straling	10
2.1.2 Warmtetransport aan constructie-oppervlakken	12
2.2 Massatransport	14
2.2.1 Dampdiffusie	14
2.2.2 Convectief damptransport	15
2.2.3 Capillair vochttransport	18
2.3 Gekoppeld warmte- en vochttransport	19
2.4 Recentelijk onderzoek naar droging van spouwmuren	21
2.4.1 Onderzoek naar spouwmuren gebruik makende van CFD	22
2.4.2 Onderzoek naar spouwmuren gebruik makende van <i>WUFI</i>	28

2.5	Bedenkingen	32
2.6	Doel van de masterproef	33
3	Gekoppeld CFD/HAM-model en <i>WUFI-2D</i>	35
3.1	Achtergrond	35
3.2	Verschillen	36
3.3	Vereenvoudigingen in het gekoppeld CFD/HAM-model	36
3.4	Vereenvoudigingen in <i>WUFI-2D</i>	37
3.5	Vergelijking van de transportvergelijkingen in het gekoppeld CFD/HAM-model en <i>WUFI-2D</i>	38
3.5.1	Randcondities	38
3.5.2	Warmte/massa-analogie	39
3.5.3	Input gekoppeld CFD/HAM-model en <i>WUFI-2D</i>	40
3.5.4	Grid- en tijdonafhankelijkheid	40
3.5.5	Resultaten	41
3.6	Besluit	44
4	Snelheidsprofiel en warmte- en vochttransport in de luchtspouw	45
4.1	Randcondities	46
4.2	Opbouw model	47
4.2.1	Convergentie criteria	47
4.2.2	Gridonafhankelijkheid via de <i>Richardson extrapolatie</i>	47
4.3	Gelijke randcondities aan beide spouwoppervlakken	51
4.3.1	Overgangscoefficienten, snelheidsprofielen en warmte/massa-analogie	51
4.4	Verschillende randcondities aan beide spouwoppervlakken	53
4.4.1	Overgangscoefficienten, snelheidsprofielen en warmte/massa-analogie	53
4.5	Studie naar de invloed van een constante tegenover een opgedeelde overgangscoefficiënt over de hoogte van de spouw	57
4.6	Input in <i>WUFI-2D</i>	58
4.6.1	Resultaten	59
4.7	Besluit	60
5	Lange golfstraling in de luchtspouw	61
5.1	Zomer	61
5.1.1	Randcondities	61
5.1.2	CASE1	63
5.1.3	CASE2	67
5.1.4	CASE3	71
5.2	Winter	74
5.2.1	Randcondities	74

5.2.2	CASE1	75
5.2.3	CASE2	76
5.2.4	CASE3	79
5.3	Besluit	80
6	Spouwventilatie in <i>WUFI-2D</i>	81
6.1	Modellering in <i>WUFI-2D</i> en in het gekoppeld CFD/HAM-model	82
6.1.1	Cases	83
6.2	Resultaten	84
6.2.1	Variatie over de hoogte van de spouw	84
6.2.2	Invloed van het ventilatievoud, de μ_{eff} -waarde en de λ_{eff} -waarde . .	86
6.3	Besluit	89
7	Vocht- en warmteoverdracht tussen spouwbladen	90
7.1	Gelijke initiële temperatuur, maar verschillende massafractie	90
7.1.1	Lage snelheden (ls) in de luchtspouw	92
7.2	Verschillende initiële temperatuur en massafractie	93
7.3	Inzichten	94
7.4	Invloed van een gesatureerd buitenspouwblad	94
7.4.1	Uitdroging van een gesatureerd materialen in <i>WUFI-2D</i>	95
7.4.2	Inzichten	97
7.5	Jaarsimulatie in <i>WUFI-2D</i> :	
	geventileerd VS. niet-geventileerd	97
7.5.1	Randcondities	98
7.5.2	Geventileerde luchtspouw	98
7.5.3	Niet-geventileerde luchtspouw	100
7.6	Besluit	102
8	Aangepast CFD/HAM-model	104
8.1	<i>Celit</i> -plaat VS. OSB-plaat: eenvoudige dagsimulatie	104
8.1.1	Zomersituatie	104
8.1.2	Wintersituatie	107
8.1.3	Inzichten	108
8.2	<i>Celit</i> -plaat VS. OSB-plaat: aangepaste weeksimulatie	109
8.2.1	Randcondities	109
8.2.2	Rekentijd beperken	110
8.2.3	Resultaten	111
8.3	<i>Celit</i> -plaat VS. OSB-plaat: jaarsimulatie in <i>WUFI-2D</i>	111
8.3.1	Randcondities	112
8.3.2	Resultaten	112

8.4	Dampscherf: aangepaste dagsimulatie	114
8.4.1	Randcondities	114
8.4.2	Resultaten	115
8.5	Besluit	116
9	Inzichten en besluiten	117
9.1	Grenslagen	117
9.2	Straling	117
9.3	Onderlinge invloed tussen spouwbladen	119
9.4	Toepassingen	120
9.5	Conclusies	121
A	Afleiding van de warmte/massa-analogie	122
B	Materiaal kenmerken	124
B.1	Basis kenmerken	124
B.2	Vochtgevoelige λ -waarde	124
B.3	Sorptie-isotherm	124
C	Weeksimulaties: resultaten	126
D	Weeksimulaties: variabele randcondities	130
	Bibliografie	135

Hoofdstuk 1

Introductie

1.1 Achtergrond

Muren zijn ontworpen om weerstand te bieden tegen krachten die de stabiliteit, sterkte en stijfheid van de constructie in het gedrang brengen. Eén zo'n kracht is bijvoorbeeld vocht. Een overmaat aan vocht kan het risico op schimmeligroei vergroten en resulteren in een degradatie van de bouwmaterialen en dus van de volledige constructie.

Vocht kan opgedeeld worden in twee soorten vocht: vloeibaar vocht en vochtige lucht (waterdamp) (Mao *et al.* (2009)). Onder vloeibaar vocht wordt bijvoorbeeld regen, opstijgend grondwater of bouwvocht verstaan. Naast regen als vochtbron mag het contact met vochtige binnen- of buitenlucht ook niet over het hoofd gezien worden (Piot *et al.* (2011)). Traditioneel worden vochtproblemen ten gevolge van regen en opstijgend grondwater constructief opgelost. Denk bijvoorbeeld aan de spouwmuur, de tweekrapsdichting bij schrijnwerk, de waterkering in de muuraanzetten...

De gevolgen van waterinfiltratie en condensatie van waterdamp zijn echter aanzienlijk. Zo kan de binnenafwerking beschadigd worden, kan er schimmeligroei voorkomen en kan de constructie zijn draagfunctie verliezen als gevolg van corrosie of rot.

Om een vochtprobleem te kunnen laten ontstaan, moet er aan minimum vier condities voldaan zijn:

- Vochtbron
- Transportmedium
- Drijfkracht
- Vochtgevoelig materiaal

Om een vochtprobleem te verhinderen is het voldoende één van deze vier condities weg te nemen. Toch is het niet zo dat de aanwezigheid van vocht in alle omstandigheden moet uitsluiten worden. Vocht is daarbij enkel toelaatbaar wanneer het de prestaties van een bouwdeel of gebouw *niet* negatief beïnvloedt. Afhankelijk van de gebruikte materialen en de randvoorwaarden kunnen vaak aanzienlijke hoeveelheden vocht getolereerd worden. Het gebouw- en constructieontwerp moet er dus voor zorgen dat de opgeslagen hoeveelheden vocht beneden een bepaalde kritische waarde blijven, afhankelijk van het schademechanisme en de toegepaste materialen.

Een balans tussen bevochtigen, drogen en opslag is vereist om een duurzaamheid van de constructie op lange termijn te waarborgen. Vochtgevoelige materialen, zoals hout en gipskarton, vereisen een sterkere droging dan meer duurzame of minder vochtgevoelige materialen, zoals beton en metselwerk.

1.1.1 Vloeibaar vocht als vochtbron

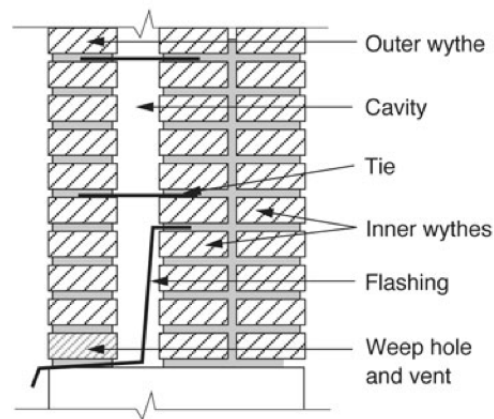
Regen is één van de meest voorkomende en vooral zichtbare vormen van externe vochtbronnen. Naast regen worden bouwvocht en opstijgend grondwater ook als vloeibaar vocht aanzien. Bij een uitvoering volgens de regels van de kunst veroorzaken deze laatste twee nauwelijks problemen. Om regendoorslag tegen te gaan is het ontwerp van de buitenmuren doorheen de jaren drastisch veranderd. Zo is de bouwschil geëvolueerd van een massieve constructie tot een spouwmuur met gelijke drukverdeling.

De massieve muur

Oorspronkelijk vertrouwde men op de massa van de muur om te werken volgens het mechanisme van absorptie en desorptie van water. Door de grote massa van de constructie konden grote hoeveelheden vocht getolereerd worden. Afhankelijk van de porositeit van de gebruikte materialen wordt de muur dikker of dunner gemaakt. Zo kon men bij een muur met een lage porositeit vertrouwen op minder regendoorslag. Hierbij werd geen rekening gehouden met het mogelijk voorkomen van scheuren die de regendoorslag zouden vergroten. Niettegenstaande waren er weinig klachten van regendoorslag doordat men bij het ontwerp van de woning er rekening mee hield om zo veel mogelijk direct water te mijden door oversteken, kroonlijsten ed. te voorzien. Doordat men inzicht kreeg in de drijvende krachten voor waterdoorslag, zoals de kinetische energie van de regendruppels, de oppervlaktespanning, de capillariteit, de zwaartekracht en de drukverschillen over de muur kon men de muren aanpassen om een hogere vocht tolerantie te bekomen. Naast de massieve muur ontstond een tweede optie, de *multiple-element protection*, beter gekend als de huidige spouwmuur.

De spouwmuur

De spouwmuur bestaat uit een binnenspouwblad en een buitenspouwblad, gescheiden door een luchtlaag, de spouw. De spouwbladen worden onderling verbonden door spouwankers (figuur 1.1).



Figuur 1.1: Opbouw van een spouwmuur bestaande uit metselwerk (Chown *et al.* (2011))

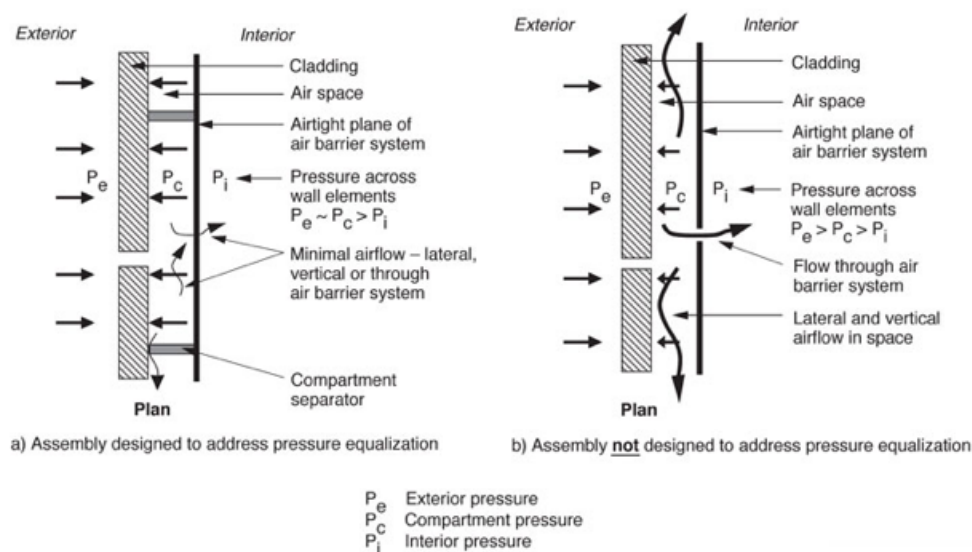
Dit principe komt zowel voor bij constructies bestaande uit metselwerk als uit een houtskelet. De spouw belemmert het water te penetreren tot het binnenspouwblad, doordat de spouwruijnte zorgt voor een capillaire breuk. In het begin van de twintigste eeuw werd er gepleit voor drainage van de spouwmuur. Vandaag de dag is het een wel gekend feit dat er drainage openingen en stootlappen voorzien worden aan de onderkant van de spouw. Deze vereiste werd in 1953 opgelegd door de National Building Code van Canada (Chown *et al.* (2011)). De openingen zouden in sommige gevallen ook kunnen dienen als ventilatie openingen om waterdamp in de spouw af te voeren. De National Building Code van Canada (Chown *et al.* (2011)) legt een minimum spouwbreedte van 5 cm op, dit om mogelijke mortel bruggen tussen binnen- en buitenspouwblad te vermijden. Ook ziet men in de houtskeletbouw vanaf de jaren 1920 een extra buitenbekleding, waardoor er een luchtruimte ontstond tussen de buitenbekleding en het houtskelet.

Het rainscreen-principe

Het rainscreen-principe werd in 1946 geïntroduceerd als manier om regendoorslag te controleren. De buitenbekleding bestond uit een licht materiaal met een lage watercapaciteit en waterdoorlatendheid. Deze werd geplaatst boven een muur uit metselwerk, gescheiden door een geventileerde luchtsouw die naast een capillaire breuk ook voor de drainage zorgde. De drijvende krachten waar hier rekening mee wordt gehouden zijn de kinetische energie van de regendruppels, de zwaartekracht, de capillariteit en de oppervlaktespanning. Het rainscreen-

principe houdt net zoals de spouwmuur geen rekening met het drukverschil als drijvende kracht voor regendoorslag.

In 1960 werd, door het werk van het NRC, het *rainscreen*-principe verder ontwikkeld tot de *open rainscreen walls*. Door openingen bij te maken en de grootte en verdeling ervan te veranderen, de luchtruimte in compartimenten op te delen en het binnenspouwblad luchtdicht te maken kan men de drukverschillen over het *rainscreen* reduceren. Door compartimentering zal men minder sterke luchtstromen krijgen. Hierdoor wordt een extra drijvende kracht voor regendoorslag gereduceerd.



Figuur 1.2: a. Werking van de *open rainscreen walls*. - b. Werking van de traditionele spouwmuur. (Chown *et al.* (2011))

1.1.2 Vochtige lucht (waterdamp) als vochtbron

Naast het transport van vloeibaar vocht kan vochtige lucht zich door middel van diffusie en via luchtlekken doorheen de constructie begeven. Indien de vochtige lucht lokaal condenseert kunnen er zich mogelijk vochtproblemen voordoen.

Diffusie

Doordat waterdamp via diffusie getransporteerd wordt van een hoge dampdruk naar een lage dampdruk zal bij een vochtige binnenomgeving het vochttransport naar buiten groter zijn. Hierbij spreekt men van damptransport. Bij damptransport ontstaat er een grotere kans

op condensatie in de constructie doordat de vochtige lucht in contact komt met een koude omgeving.

In de praktijk maakt men voor de vochtbeheersing in constructies gebruik van binnenklimaatklassen om de grootte van de belasting van waterdamp te beschrijven. Deze vormen dus een maat voor de vochtbelasting van de binnenlucht op de constructie. In het algemeen wordt de binnenklimaatklasse bepaald op basis van de gebouwfunctie. Zo zal bij een klimaatklasse 1 de dampdruk zo laag zijn dat er nauwelijks inwendige condensatie kan optreden. Voorbeelden hiervan zijn bijvoorbeeld sportzalen of garages. Klimaatklasse 4 daarentegen komt overeen met een grote dampproductie, zoals een zwembad of wasplaats (Janssens (2008)).

Luchtdichtheid

Als gevolg van de drukverschillen tussen binnen en buiten omgeving zullen er zich vochtige luchtstromen doorheen de constructie begeven met een debiet gelijk aan:

$$g_a = C \Delta p_a^n \quad (1.1)$$

Met C de luchtdoorlatendheid coëfficiënt [$kg/(m^2 s Pa^n)$], Δp_a het luchtdrukverschil en n de lucht permeantie coëfficiënt. Bij een drukverschil van $50 Pa$ zouden er debieten tot $127 m^3/(m^2 u)$ door een wand uit metselwerk kunnen passeren. Door op het binnenspouwblad met een pleisterafwerking te werken zouden deze debieten kunnen verlaagd worden tot een debiet van $1,5 m^3/(m^2 u)$ (Hens & Janssens (2007), Hens (2005)). Een goede luchtdichtheid van het binnenspouwblad is dus een voorwaarde voor een goede hygrothermische prestatie van de bouwschil.

1.2 Principiële werking van de spouwmuur

Spouwventilatie is, afhankelijk van klimaat tot klimaat, noodzakelijk voor de droging van de bouwschil. De muuropbouw die in dit eindwerk geëvalueerd wordt is een veel voorkomend type in de ons huidige klimaat. Het is een spouwmuur bestaande uit een buitenafwerking in metselwerk, een luchtspouw en een binnenspouwblad bestaande uit een houtskelet.

1.2.1 Massatransport

Bij het toepassen van een buitenspouwblad uit metselwerk wordt een deel van de regen aan het buitenoppervlak van het buitenspouwblad afgeleid door drainage en wordt er een ander deel opgeslagen door het buitenspouwblad, waarna het vervolgens na capillair transport door het buitenspouwblad weg loopt aan de spouwzijde. Een ander deel van het vocht stroomt als gevolg van de zwaartekracht door de micro scheuren tussen de mortel en de kopse kant van de bakstenen. Slechts een gedeelte van het water dat de spouw bereikt zal tot beneden aflopen en daar via een spuitgat naar buiten worden afgevoerd. De rest zal terug worden opgezogen door de bakstenen en de mortel verbindingen.

Samengevat kan vocht in spouwmuren verwijderd worden via verschillende wegen:

- Drainage onder invloed van de zwaartekracht.
- Capillair transport van gebonden vloeibaar water naar het buitenoppervlak van het buitenspouwblad om daar te verdampen.
- Diffusie en/of convectie van waterdamp.
- Convectieve stromingen van buitenlucht door de luchtspouw.

Er zijn twee primaire drijfkrachten voor de ventilatiestroom: de winddruk en het *stack effect* als gevolg van de opwarming van de lucht. Bijkomende maar minder belangrijke drijfkrachten zijn warmte- en wind pumping en het *stack effect* als gevolg van vocht die zorgt voor verschillen in dichtheid. Voor de theorie en de relatieve belangrijkheid van elk van deze fenomenen wordt verwezen naar (Straube (2009)). Mayer en Künzle (Mayer & Künzle (1983)) kwamen in hun onderzoek naar spouwmuren met een buitenafwerking bestaande uit plaatmateriaal tot dezelfde resultaten zoals Straube. Ze bekwamen in hun onderzoek luchtsnelheden in de spouw van 0,05 tot 0,15 m/s bij windsnelheden tussen 1 en 3 m/s . De windrichting had een grotere invloed op de luchtsnelheid in de spouw dan de windsnelheid. Ook was een breedte van 20 mm voldoende voor de droging bij het toepassen van panelen als buitenafwerking. Ten laatste besloten ze dat de grootte van de in- en uitlaatopeningen zo groot mogelijk moeten zijn om het ventilatiedebiet te vergroten.

Door zijn poreuze structuur en de aanwezige spuitgaten is een buitenspouwblad opgebouwd uit metselwerk niet luchtdicht en is er dus altijd gedwongen ventilatie als gevolg van de winddruk. Door de invallende straling van de zon op het buitenspouwblad en de aanwezige vochtbronnen is er ook natuurlijke ventilatie als gevolg van het *stack effect*. Deze convectiestromen helpen slecht voor een kleine fractie mee in de droging van het buitenspouwblad indien deze uit metselwerk bestaat. Het grootste deel van de droging gebeurt via het buitenoppervlak (Hens & Janssens (2007)). Straube deed ook onderzoek naar dit fenomeen in (Straube (2009)) en zag daarentegen dat ventilatie wel zorgde voor droging en reductie van de drukverschillen over het metselwerk waardoor het damptransport als gevolg van een drukverschil naar binnen verminderde.

Er moet er wel op gewezen worden dat ventilatie van de spouw om de droging van het buitenspouwblad te versnellen dubbel is: aan de ene kant wordt de dampdruk door ventilatie verlaagd, aan de andere kant wordt de temperatuur in de spouw in de winter verlaagd, waardoor het drogen vertraagd wordt (Hens & Janssens (2007)). Zo kan in vochtige klimaten de spouwventilatie er zelfs voor zorgen dat er bevochtigd wordt in plaats van gedroogd. De kwantitatieve invloed van een geventileerde spouw is dus afhankelijk van het beoogde klimaat.

Bij een goede uitvoering van de spouw zal het binnenspouwblad niet vochtig worden als gevolg van regendoorslag, maar wel als gevolg van dampdiffusie. De ventilatie van de spouw dient dan om het binnenspouwblad te drogen. Afhankelijk van de binnenklimaatklasse zal de vochtbelasting binnen groter of kleiner zijn. In tegenstelling tot een spouwmuur opgebouwd uit een binnenspouwblad uit metselwerk, bestaat de kans erin dat bij een spouwmuur bestaande uit een binnenspouwblad uit een houtskelet ventilatie wel noodzakelijk is voor de droging van het hout en de afvoering van waterdamp weg uit de spouw. Dit doordat er bij hout een verhoogde kans bestaat op degradatie door biologische effecten.

Samengevat kan een luchtspouw gezien worden als:

- Een capillaire breuk
- Een drainage zone
- Een ventilatie kanaal
- Een oorzaak van een gelijke drukverdeling

Naast het beoogde klimaat zijn ook de materialen grenzend aan de spouw belangrijk. Deze materialen moeten het mogelijk maken om vocht te transporteren van de aangrenzende materialen naar de luchtspouw. Voor een meer uitgebreid en algemener overzicht van het reeds gedane onderzoek naar luchtspouwen en hun invloed op het vocht en warmte transport wordt verwezen naar (Straube & Finch (2009) en Salonvarra *et al.* (2007)).

Degradatie

In de bouwnijverheid kent men verschillende biologische processen die schade en veroudering veroorzaken in gebouwen. Dit is gedeeltelijk te wijten aan het natuurlijk verouderen van de materialen en als gevolg van de blootstelling aan overmatige hoeveelheid vocht. Zo kan vocht zorgen voor:

- Corrosie bij metalen elementen
- Uiteenvallen van materialen zoals gips ed.
- Vorstschade
- Verkleuringen van materialen
- Volumeverandering die de structuur negatief beïnvloedt of scheuren veroorzaakt
- Groei van schimmels en/of paddestoelen

Voor de ontwikkeling van schimmels is een minimale relatieve omgevingsvochtigheid nodig van 80 à 90%, afhankelijk van andere factoren zoals omgevingstemperatuur, blootstellingstijd, het soort materiaal en de oppervlakte eigenschappen ervan.

Voor een ontwikkeling van rot is een kritische relatieve vochtigheid van meer dan 95% nodig, tevens weer afhankelijk van materiaaleigenschappen, temperatuur en blootstellingstijd. In de praktijk zijn er nog meerdere parameters die schimmelgroei veroorzaken zoals de dikte van de materiaallagen gecombineerd met de lokale warmte en massa overgangscoefficiënt. Voor meer informatie rond de invloedsparameters wordt verwezen naar (Viitanen & Vinha (2008)).

Schimmel zorgt naast de degradatie van materialen er ook voor dat de lucht in de aanliggende ruimte gevuld wordt met vluchtige componenten en sporen en dit in een tijdperk waar de vraag naar duurzaamheid, energiebalans en de gezondheid van huizen continu stijgt.

De ontwikkeling van rot zorgt ook voor een verlies van structurele stijfheid. Uit eerdere studies is gebleken dat houten oppervlakken veel gevoeliger zijn voor schimmelaantasting dan betonnen elementen (Viitanen & Vinha (2008)).

In (Vereecken & Roels (2012)) wordt een overzicht gegeven van verschillende bestaande modellen om het risico op schimmelgroei te voorspellen en een bijhorende analyse op vlak van de impact van het model op de evaluatie van de schimmelgroei. Op basis van deze resultaten wordt dan de invloed van vereenvoudigingen of tekortkomingen in de modellen bediscussieerd. In het artikel wordt erop gewezen dat vaak grote verschillen zitten op de resultaten van de verschillende modellen. Een variatie in materiaal kenmerken, vochtbelasting, overgangscoefficienten ed. of een slechte uitvoering van de constructie kan ervoor zorgen dat er

schimmelgroei ontstaat. Dit in tegenstelling tot de misschien eerder voorspelde theoretische afwezigheid van schimmelgroei.

1.2.2 Warmtetransport

Naast vochtuitwisseling in de constructie, zorgen convectiestromen ook voor het transport van warmte.

Door natuurlijke en gedwongen convectie in de spouw kan men oververhitting in de zomer als gevolg van de invallende kortegolf straling van de zon voorkomen door de warmte in de spouw terug naar buiten af te voeren. Deze warmteafvoer zorgt ervoor dat de koellasten binnenin de woning gereduceerd worden. De convectie in de spouw zorgt in de winter wel voor extra warmteverliezen naar buiten toe. In de winter wordt de warmte die van binnen komt door convectie afgevoerd. Dit probleem kan deels voorkomen worden door extra te isoleren. Een ander negatief gevolg van ventilatie is dat er mogelijke luchtrotaties rond de isolatie ontstaan, waardoor de isolatie wordt kort gesloten en er extra warmteverliezen ontstaan. Dit gebeurt enkel bij poreuze materialen en als er ontwerp- of uitvoeringsfouten voorkomen (Hens & Janssens (2007)).

1.3 Inzichten

Ventilatie van de spouw heeft dus zowel positieve als negatieve gevolgen op vlak van warmte- en vochttransport. Om de kwantiteit van deze gevolgen te begroten moet men situatie per situatie apart bekijken aangezien deze sterk klimaat afhankelijk zijn.

Hoofdstuk 2

Literatuurstudie

De literatuurstudie concentreert zich in het eerste deel op het warmte- en vochttransport in de spouw als aparte fenomenen. Dit onderdeel is voornamelijk gebaseerd op (Janssens (2008) en Hens (1997)). Erna wordt er ingegaan op het gekoppeld warmte- en vochttransport in de spouw.

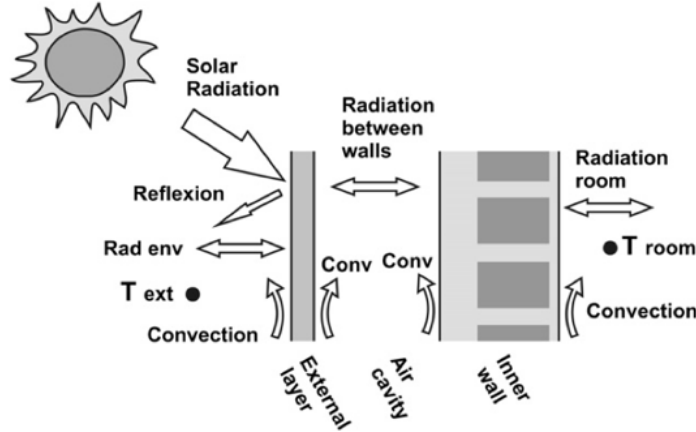
In het laatste deel wordt er een overzicht gegeven van de recentelijke studies op vlak van het gebruik van CFD en *WUFI*, twee simulatie programma's (hoofdstuk 3), om het gedrag van (geventileerde) spouwmuren te bestuderen op vlak van warmte- en vochttransport.

2.1 Warmtetransport

Warmte kan zowel uitgewisseld worden onder voelbare vorm, dat wil zeggen gekoppeld aan temperatuurverschillen, als in latente vorm, dat wil zeggen als transformatiewarmte. Latente warmte treedt op bij vochttransport dat gepaard gaat met toestandsveranderingen. Bij de toestandsverandering komt plaatselijk warmte vrij (stollen, condenseren) of wordt warmte onttrokken (smelten/verdampen). Transport van voelbare warmte gebeurt door geleiding, convectie en straling. In een spouwmuur komen al deze vormen van warmte-overdracht samen (figuur 2.1).

2.1.1 Geleiding, convectie en straling

Geleiding, convectie en straling zijn de drie vormen van warmte transport die zich voordoen in en rond de spouwmuur. Ten eerste heeft men geleiding. Geleiding treedt op tussen twee stoffen op een verschillende temperatuur in ideaal contact met elkaar of tussen punten op een verschillende temperatuur in eenzelfde stof. Er is dus een medium nodig voor geleiding. Convectie daarentegen is het warmtetransport ten gevolge van stroming van fluïda, dit kunnen zowel vloeistoffen als gassen zijn. In tegenstelling tot geleiding gaat deze vorm van warmteoverdracht gepaard met macroscopische beweging van moleculen. De convectieve



Figuur 2.1: Warmte-overdracht in de spouwmuur (Sanjuan *et al.* (2011a))

warmtestroomdichtheid q_c tussen een fluïdum en een oppervlak wordt dan beschreven door:

$$q_c = \alpha_c(\Theta_l - \Theta_s) \quad (2.1)$$

Met α_c de convectieve warmteovergangscoefficiënt [$W/(m^2K)$], Θ_l de temperatuur van het fluïdum [K] en Θ_s de temperatuur van het oppervlak [$^{\circ}C$].

Naast geleiding en convectie is er ook nog de lange- en kortegolf straling in de spouw. Straling is per definitie het warmtetransport ten gevolge van elektromagnetische golven, uitgestraald door materiaaloppervlakken. Bij straling is er geen medium nodig voor de warmte-overdracht, dit in tegenstelling tot geleiding en convectie. Bij spouwmuren maken we een onderscheid tussen kortgolvlige en langgolvlige straling. Dit is een rechtstreeks gevolg van toepassing van de verschuivingswet van Wien, die zegt dat de golflengte vermenigvuldigd met de temperatuur een constante is:

$$\lambda_M T = C_{te} = 2898 \mu m K \quad (2.2)$$

Dus bij hoge temperaturen, zoals die van de zon, zal de uitgezonden golflengte korter zijn dan bij straling uitgestraald door oppervlakten op omgevingstemperatuur (-50 à $100^{\circ}C$). Zo spreekt men van kortgolvlige- of zonnestraling op het buitenspouwblad en langgolvlige- of infraroodstraling in de spouw en tussen de omgeving en het buitenspouwblad.

Voor de warmteoverdracht als gevolg van de langegolf straling in de spouw tussen de twee spouwvlakken geldt volgende formule:

$$q_{(r,12)} = \frac{\sigma(\Theta_1^4 - \Theta_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (2.3)$$

Dit toont aan dat men de warmteoverdracht in spouwen kan verminderen door de emissiefactor (ϵ) van één van beide vlakken te verlagen. Voor de meeste bouwmaterialen is ϵ gelijk aan 0,8 à 0,95.

2.1.2 Warmtetransport aan constructie-oppervlakken

Ter hoogte van de constructie-oppervlakken komen de hiervoor besproken warmtetransport-mechanismen samen voor. Voor de praktische berekening van de totale warmtestroom is het makkelijker te werken met één enkele warmte overgangscoefficiënt en omgevingsreferentietemperatuur.

Binnenomgeving

De warmteoverdracht van de binnenomgeving naar het binnenoppervlak van de constructie q_i vindt plaats zowel door convectie als door straling:

$$q_i = q_{ci} + q_{ri} = \alpha_{ci}(\Theta_{ai} - \Theta_{si}) + \alpha_{ri}(\Theta_{ri} - \Theta_{si}) \quad (2.4)$$

De referentietemperatuur voor het convectief transport is de centrale luchttemperatuur Θ_{ai} in de ruimte, die voor het transport door straling de stralingstemperatuur Θ_{ri} van de ruimte die de constructie omgeeft. Deze laatste hangt af van de oppervlaktetemperatuur en de afmetingen van alle vlakken, zoals binnenwanden, plafond, vloer, radiatoren... die naar de betreffende constructie gericht zijn. Vergelijking (2.4) kan dan herwerkt worden tot:

$$q_i = \alpha_i(\Theta_{ref,i} - \Theta_{si}) \quad (2.5)$$

Met:

$$\alpha_i = \alpha_{ci} + \alpha_{ri} \quad (2.6)$$

De warmteovergangscoefficiënt binnen α_i is de som van de convectieve en stralingsovergangscoefficiënt, met normwaarde $8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Janssens (2008)). De referentietemperatuur van de binnenomgeving $\Theta_{ref,i}$ is het gewogen gemiddelde van lucht- en stralingstemperatuur:

$$\Theta_{ref,i} = \frac{\alpha_{ci}\Theta_{ai} + \alpha_{ri}\Theta_{ri}}{\alpha_{ci} + \alpha_{ri}} \quad (2.7)$$

Voor verticale wanden wordt voor de referentietemperatuur het gemiddelde genomen tussen de stralings- en luchttemperatuur.

Buitenomgeving

De warmteoverdracht aan het buitenoppervlak van de constructie is complexer dan bij de binnenomgeving. Daar zijn er naast de convectieve warmtestromen nog de warmtestromen ten gevolge van straling komende van drie stralingsbronnen:

- De zon, gekenmerkt door kortgolvlige irradiantie I_s op het buitenoppervlak.
- De directe omgeving (grond, omliggende bebouwing en beplanting), gekenmerkt door een stralingstemperatuur Θ_{re} .
- De hemelkoepel, die langgolvlige straling met het constructieoppervlak uitwisselt, gekenmerkt door een stralingstemperatuur Θ_{rsky} .

De som van de warmtestromen aan het oppervlak is dan:

$$q_e = \alpha_{ce}(\Theta_{ae} - \Theta_{se}) + a_s I_s + \alpha_{re} F_{se}(\Theta_{re} - \Theta_{se}) + \alpha_{re} F_{ssky}(\Theta_{rsky} - \Theta_{se}) \quad (2.8)$$

Met a_s de absorptiefactor voor kortgolvlige straling van het constructieoppervlak, F_{se} de hoekfactor vlak-omgeving en F_{ssky} de hoekfactor vlak-hemelkoepel. Deze factoren hangen af van de helling ω van het oppervlak. Voor verticale oppervlakken is $\omega = 90$ graden en stralen de oppervlakken voor de helft naar de hemelkoepel en voor de helft naar de omgeving:

$$F_{se} = \frac{1 - \cos\omega}{2} \quad (2.9)$$

$$F_{ssky} = \frac{1 + \cos\omega}{2} \quad (2.10)$$

De vorige vergelijking kan compacter geschreven worden door enkele vereenvoudigingen in te voeren:

- De stralingstemperatuur van de buitenomgeving Θ_{re} en de referentie-luchttemperatuur Θ_{ae} worden gelijk gesteld aan de meteorologische buitentemperatuur Θ_e
- De stralingstemperatuur van de hemelkoepel is een waarde $\Delta\Theta_{ssky}$ lager dan de buitentemperatuur en wordt experimenteel bepaald.

Bij heldere hemel is 's winters de stralingstemperatuur van de hemelkoepel tot 24°C kouder dan de buitentemperatuur. Bij zware bewolking is dat verschil in de winter 3°C. Zo kunnen de langgolvlige warmteverliezen in ons klimaat groter zijn dan de ontvangen zonnearmte. Dit komt doordat de hemelkoepel uit gassen bestaat en deze geen continu stralingsspectrum hebben, zoals vloeistoffen en vaste stoffen. Daardoor is de totale straling uitgestraald door de hemelkoepel op dezelfde temperatuur als de omgeving veel kleiner. Het gevolg hiervan is dat het oppervlak meer straling uitstraalt dan dat het er in principe ontvangt en op die manier warmte verliest. Overdag worden deze verliezen nauwelijks opgemerkt door de veel grotere warmtewinsten van de kortgolvlige zonnestraling. 's Nachts daarentegen, bij afwezigheid van kortgolvlige zonnestraling, koelt het oppervlak af tot onder de omgevingstemperatuur, waardoor er onderkoeling van het oppervlak ontstaat.

Herwerking van de vergelijking geeft na vereenvoudiging:

$$q_e = \alpha_e(\Theta_{ref,e} - \Theta_{se}) \quad (2.11)$$

Met:

$$\alpha_e = \alpha_{ce} + \alpha_{re} \quad (2.12)$$

Met voor α_e als normwaarde $23 \text{ W}/(m^2K)$ (Janssens (2008)) en:

$$\Theta_{ref,e} = \Theta_e + \frac{a_s I_s - \alpha_{re} F_{ssky} \Delta \Theta_{sky}}{\alpha_{ce} + \alpha_{re}} \quad (2.13)$$

Deze referentietemperatuur wordt ook wel de equivalente buitentemperatuur of de sol-air-temperatuur genoemd.

2.2 Massatransport

Bij gebouwen bestaan er verschillende vochtbronnen die aan de basis liggen van de aanwezigheid van vocht in bouwconstructies: contact met vloeibaar vocht, zoals regen, grondwater of bouwvocht, of contact met vochtige binnen- of buitenlucht. Dit vocht wordt vervolgens in de bouwconstructie getransporteerd. Zo onderscheidt men enerzijds voor het damptransport:

- Dampdiffusie
- Convectief damptransport

en voor het vloeibaar vochttransport:

- Capillair vochttransport

2.2.1 Dampdiffusie

Dampdiffusie is de verplaatsing van waterdampmoleculen ten gevolge van verschillen in dampconcentraties in de lucht of in de poriën van poreuze materialen. De beschrijving van het diffusief transport verloopt analoog met dat van de warmtegeleiding. In tegenstelling tot geleiding waar de temperatuur de drijfkraft is, is voor diffusie de keuze van de drijfkraft niet vast gelegd. Zo kan men de dampdiffusie bijvoorbeeld schrijven in functie van de dampdruk (p_v).

Om de grootte van de dampdiffusie te beschrijven wordt in de praktijk het dampdiffusieweerstandsgetal, μ , gebruikt dat aangeeft hoeveel kleiner de dampdoorlatendheid is in vergelijking met die van stilstaande lucht:

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (2.14)$$

Materialen met een grote μ -waarde zijn dampremmend of dampdicht bij een oneindige μ -waarde. Deze μ -waarde is ook afhankelijk van de relatieve vochtigheid van de lucht. Deze curve kan volgens (IEA (2000)) beschreven worden door de functie:

$$\mu = \frac{1}{a + b\varphi^n} \quad (2.15)$$

Met a , b en n de *fitting*-parameters.

2.2.2 Convectief damptransport

Convectief damptransport is gelijkaardig aan het convectief warmtetransport. In de praktijk veronderstelt men dat er in de lucht een goede menging is van waterdamp als gevolg van de luchtstromen, waardoor men de vochtigheid van de lucht kan kenmerken door een enkele referentiewaarde voor de dampdruk. Voor lucht speelt diffusie van waterdamp een verwaarloosbare rol, behalve ter plaatse van constructie-oppervlakken waar er een grenslaag bestaat. Net zoals men doet bij convectief warmtetransport wordt het verband tussen de dampstroomdichtheid naar een constructie-oppervlak en het dampdrukverschil tussen lucht en oppervlak uitgedrukt door middel van een overgangscoefficiënt:

$$g_v = \beta_p(p_v - p_{v,s}) = \delta_a \cdot \text{grad}(p_v)|_s \quad (2.16)$$

Met p_v de referentiewaarde van de dampdruk buiten de grenslaag, $p_{v,s}$ de dampdruk ter plaatse van het oppervlak en β_p de massaovergangscoefficiënt [s/m].

Aangezien er een evenredigheid bestaat tussen het convectief warmte- en damptransport, is het logisch dat er een evenredigheid bestaat tussen beide overgangscoefficienten. De waarden van deze evenredigheid kunnen in de literatuur lichtjes verschillen van elkaar. Zo wordt in (Janssens (2008)) volgende waarde opgelegd:

$$\beta_p = 6 \cdot 10^{-9} \cdot \alpha_c \quad (2.17)$$

en in (Hens (1997)) wordt de volgende waarde gebruikt:

$$\beta_p = 7,7 \cdot 10^{-9} \cdot \alpha_c \quad (2.18)$$

en in (Künzel (2011)) wordt de volgende waarde gebruikt:

$$\beta_p = 7 \cdot 10^{-9} \cdot \alpha_c \quad (2.19)$$

Voor de achtergrond en de afleiding van de algemene warmte en massa analogie wordt verwezen naar (bijlage A (Chilton & Colburn (1934))). Als standaardvoorwaarden voor de massaovergangscoefficiënt gebruikt men (Janssens (2008)):

Binnen (vrije convectie):

$$\beta_{i,p} = 18,5 \cdot 10^{-9} s/m \quad (2.20)$$

Buiten (gedwongen convectie)

$$\beta_{e,p} = 140 \cdot 10^{-9} s/m \quad (2.21)$$

Sorptie-isotherm

De oorzaak voor de opname van waterdamp door een materiaal zijn de adhesie krachten tussen de waterdamp moleculen uit de lucht en de moleculen van de vaste materie. Hierdoor worden

de waterdamp moleculen uit de lucht aan de poriënwallen van het materiaal gebonden. Dit verschijnsel heet moleculaire adsorptie. Dit proces overheerst bij een lage relatieve vochtigheid en wordt sterk beïnvloed door de poriënverdeling van het materiaal. Aangezien materialen met kleine poriën bij gelijke porositeit een groter poriënoppervlak hebben dan materialen met grotere poriën, nemen fijn poreuze materialen meer vocht op bij een lage relatieve vochtigheid.

Bij een hogere relatieve vochtigheid ontstaat capillaire condensatie. Dit is het condenseren van vochtige lucht boven een hol wateroppervlak. Bij toenemende dikte van de geadsorbeerde waterlaagjes maken de laagjes contact en ontstaan holle watermenisci. Door de grotere resulterende kracht op de watermoleculen boven een hol wateroppervlak is de dampdruk van de verzadigde lucht kleiner dan de verzadigingsdruk p_{sat} boven een vlak wateroppervlak. De verhouding tussen de dampdruk boven de holle meniscus (p'') en de saturatie dampdruk (p_{sat}) wordt beschreven door de Wet van Thompson:

$$\frac{p''}{p_{sat}} = \exp\left(\frac{-C^{te}}{Td}\right) \quad (2.22)$$

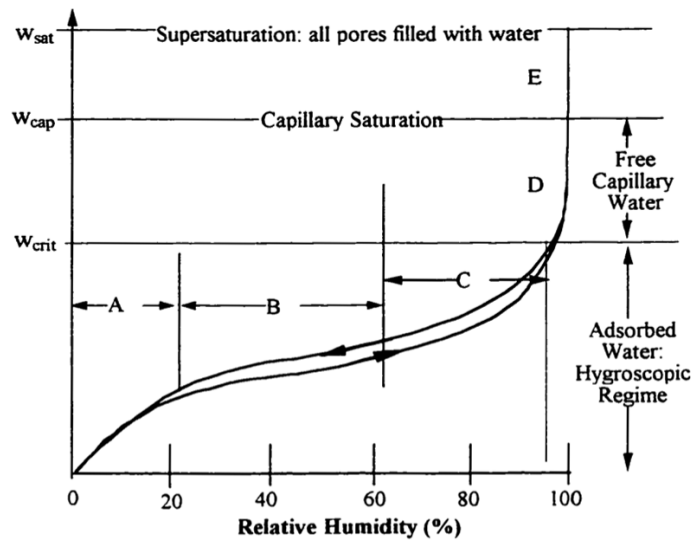
Met T de temperatuur [K] en d de poriëndiameter [m]. De evenredigheidsconstante is in functie van de oppervlaktespanning en dichtheid van water, de gasconstante van waterdamp en de contacthoek water-poriënwand en is bij benadering gelijk aan $6,6 \cdot 10^{-7} mK$.

Dus als gevolg van de intermoleculaire krachten kan vochtige lucht in contact met een watermeniscus in isotherme omstandigheden condenseren bij een relatieve vochtigheid van minder dan 100%. De condensatie stopt dan als de dampdruk van de lucht gelijk is aan de verzadigingswaarde boven de meniscus.

Het verband tussen de relatieve vochtigheid (φ) en het vochtgehalte (w) wordt weergegeven door de sorptie-isotherm (figuur 2.2). Deze curve wordt volgens (IEA (2000)) beschreven door de functie:

$$w = w_{sat} \left(1 - \frac{\ln(\varphi)}{A}\right)^{-\frac{1}{n}} \quad (2.23)$$

Met w_{sat} , n en A de *fitting*-parameters.



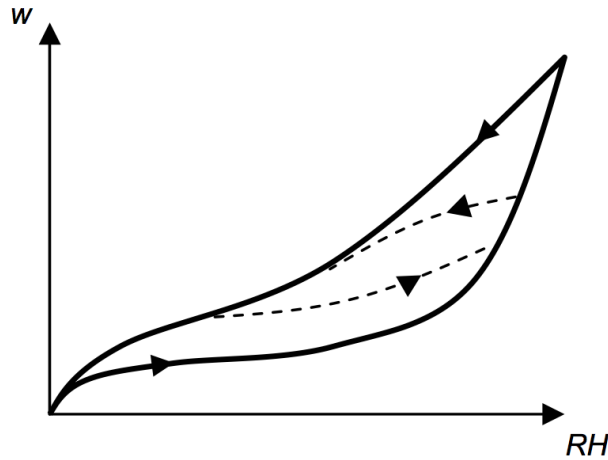
Figuur 2.2: Moleculaire adsorptie en capillaire condensatie (Straube (2009)).

Hysteresis

Voor sommige materialen is de sorptie isotherm een unieke relatie. Nochtans voor vele materialen, zoals hout, bestaat er hysteresis in het sorptie proces, wat betekent dat de relatie tussen vochtgehalte en relatieve vochtigheid niet langer kan uitgedrukt worden door één unieke relatie.

Hysteresis van het sorptie proces is gekarakteriseerd door een hoofd adsorptie isotherm (onderste dikke curve in figuur 2.3), dit is de curve die gevolgd wordt bij het vochtig worden van een initieel droog materiaal. De hoofd desorptie isotherm (bovenste dikke curve in figuur 2.3) is de curve die gevolgd wordt tijdens het drogen van een initieel gesatureerd materiaal. Deze twee curven vormen de grenzen van alle mogelijke φ - w combinaties die kunnen voorkomen in het materiaal.

In het geval de adsorptie start voor dat een gesatureerd materiaal volledig is uitgedroogd, wordt er een curve gevormd die start van een punt op de desorptie-isotherm en loopt naar de hoofd adsorptie-isotherm. Zo'n curve wordt een *scanning*-curve genoemd (curve in stippellijn in figuur 2.3). Het vochtgehalte geassocieerd met een bepaalde relatieve vochtigheid is dus afhankelijk van de geschiedenis van de sorptie-isotherm.



Figuur 2.3: Sorptie isotherm

De fenomenen die verantwoordelijk zijn voor het hysteresis effect van vochttopslag zijn het verschil in contact hoeken tussen adsorptie en desorptie, het ink bottle effect, het pseudo evenwicht (trage veranderingen in vochtgehalte) en de fysische/chemische interactie tussen poriën en water (zoals bijvoorbeeld zwellen en krimpen)(Steeman (2009)).

2.2.3 Capillair vochttransport

Naast het transport van waterdamp als gevolg van een dampdrukverschil of door convectie wordt vloeibaar vocht getransporteerd door middel van capillaire zuiging.

Onder capillair vochttransport wordt de stroming van water in poreuze materialen verstaan ten gevolge van intermoleculaire krachten tussen water en poriënwand. Op het eerste zicht kan men veronderstellen dat het vochtgehalte bij poreuze materialen in contact met vochtige lucht bestaat uit het waterdampgehalte van de lucht die in de poriën van het materiaal doordringt. Dan zou door toepassing van de ideale gaswet het vochtgehalte niet meer of enkele grammen per m^3 poreus materiaal kunnen bedragen:

$$w = \frac{m_v}{V} = \frac{p\Psi_o}{R_v T} \quad (2.24)$$

Met w het vochtgehalte [kg/m^3], V het volume poreus materiaal en Ψ_o de open porositeit, d.i. de verhouding tussen het poriënvolume dat toegankelijk is voor lucht en het materiaalvolume. In werkelijkheid blijkt echter dat het vochtgehalte veel hoger ligt en dat het vochtgehalte hoofdzakelijk bepaald wordt door de relatieve vochtigheid van de lucht. Dit wordt het hygroscopisch gedrag van poreuze materialen genoemd. De waterdampmoleculen uit de lucht worden aan de poriënwanden van het materiaal gebonden. Het bij een bepaalde

relatieve vochtigheid behorende vochtgehalte van het materiaal, noemt men het evenwichtsvochtgehalte.

2.3 Gekoppeld warmte- en vochttransport

Na een overzicht van het warmte- en vochttransport als aparte fenomenen, moeten deze om correct te werken als gekoppeld beschreven worden aangezien er zich een sterke onderlinge verwevenheid voordoet. Massatransport betekent per definitie warmtetransport. Dit wordt geïllustreerd in volgende fenomenen:

- Massaverplaatsing brengt enthalpietransport met zich mee.
- Temperatuurverschillen introduceren massatransport zoals natuurlijke convectorie bij lucht, diffusie bij waterdamp, verplaatsing ten gevolge van wijziging van oppervlaktespanning bij poriënwater.
- De thermische eigenschappen zoals warmtecapaciteit (C) en warmtegeleidingscoëfficiënt (λ -waarde) zijn nadrukkelijk functie van het vochtgehalte.
- De vochttransport eigenschappen hangen af van de temperatuur.

Door warmte- en massatransport los van elkaar te beschreven wordt er dus een ontoelaatbare vereenvoudiging van de werkelijkheid gemaakt. Daarom moeten we warmte- en massatransport aan elkaar koppelen.

Voor de vocht massabalans in een systeem voor isotherm vochttransport geldt:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial w_l}{\partial t} + \frac{\partial w_v}{\partial t} = \nabla \cdot (K_l \nabla p_c) + \nabla \cdot (\delta \nabla p_v) \quad (2.25)$$

Met K_l de transportcoëfficiënt voor water, p_c de capillaire druk, δ de waterdamp diffusiecoëfficiënt en p_v de dampdruk. Het eerste deel van het rechter lid beschrijft dus het transport van vloeibaar water en het tweede deel het damptransport. Voor meer details over deze transportvergelijkingen wordt verwezen naar (Carmeliet (2006)).

Om deze vergelijking te kunnen oplossen moet men deze vergelijking herschrijven naar één enkele drijfpotentiaal. Dit kan bijvoorbeeld de capillaire dampdruk p_c zijn.

Als men deze vergelijking herschrijft naar p_c moet men gebruik maken van enkele bijkomende relaties: de relatie tussen watergehalte en capillaire druk, de relatie tussen relatieve vochtigheid en capillaire druk (Wet van Kelvin) en de definitie van waterdampgehalte in functie van het watergehalte:

$$w_l(p_c) \quad (2.26)$$

$$\rho_v = \frac{p_{vsat}\varphi}{R_v T} = \rho_{vsat} \exp\left(\frac{p_c}{\rho_l R_v T}\right) \quad (2.27)$$

$$w_v = \left(\varphi_0 - \frac{w_l}{\rho_l}\right)\rho_v \quad (2.28)$$

Stel dat in plaats van de dampdruk p_c de massafractie (Y) gebruikt wordt als drijfpotentialaai dan zal als bijkomende relatie de definitie van de massafractie gebruikt worden:

$$Y = \frac{\rho_v}{\rho} = \frac{p_v}{\rho R_v T} \quad (2.29)$$

In de meeste gevallen kunnen de termen die de opslag in de gasfase beschrijven, verwaarloosd worden met respect voor de waterfase:

$$\frac{\partial w_l}{\partial t} \cong \frac{\partial w}{\partial t} = C \frac{\partial p_c}{\partial t} \quad (2.30)$$

Met $C = \partial w_l / \partial p_c$ de vochtcapaciteit. Het rechter lid van de vocht massabalans kan dan geschreven worden in functie van de capillaire druk:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\left(K_l + \delta p_{vsat} \frac{\partial \varphi}{\partial p_c} \right) \nabla p_c \right] \quad (2.31)$$

Door de Wet van Kelvin toe te passen komen we dan tot:

$$C \frac{\partial p_c}{\partial t} = \nabla \cdot [K(p_c) \nabla p_c] \quad (2.32)$$

Met C de vochtcapaciteit van het poreus materiaal en $K(p_c)$ de totale vochtdoorlatendheid:

$$K(p_c) = K_l(p_c) + K_v(p_c) \quad (2.33)$$

2.4 Recentelijk onderzoek naar droging van spouwmuren

De droging van constructies kan gebeuren door middel van een luchtspouw die het overtollige vocht afvoert door drainage of door diffusie en convectorie: het vocht in het poreus materiaal diffundeert naar de luchtspouw door een verschil in dampdruk en wordt daar via convectorie afgevoerd. Hoe groter het ventilatiedebiet, hoe groter de convectorieve term, dus hoe groter het aandeel convectorieve vochtafvoer.

Experimenteel werd naar deze fenomenen al veel onderzoek gedaan. In (Saelens & Hens (2001)) wordt uit experimenten het ventilatiedebiet beschreven als proportioneel met de vierkantswortel van het temperatuurverschil tussen de spouw en de buitenlucht. Aangezien dit artikel handelt over actieve gevels wordt de temperatuur als grootste drijfkracht voor natuurlijke ventilatie gezien. Hier wordt de luchtstroom in het algemeen als gevolg van de temperatuurverschillen en winddruk experimenteel geëvalueerd. Door (Alturkistani *et al.* (2008)) en (Fazio *et al.* (2007)) werd tevens experimenteel onderzoek gedaan naar het gedrag van een luchtspouw, maar dan meer specifiek naar het de relatieve droogcapaciteit van verschillende spouwmuurconfiguraties. In (Fazio *et al.* (2007)) wordt er expliciet gebruik gemaakt van hout afgeleide materialen, die namelijk vocht gevoeliger zijn. Hier wordt de DEI (*Drying by Evaporation Index*) gebruikt als meetmethode. In (Mao *et al.* (2009)) wordt er tevens een evaluatie methode, de ICEA-methode (*In-Cavity Evaporation Allowance*), ontwikkeld om een vergelijking te kunnen maken tussen de droogcapaciteiten van verschillende type materialen gebruikt voor een houtskelet.

Naast experimenteel onderzoek werden er om praktische redenen heel wat computer simulatie programma's ontwikkeld om het gedrag van constructie elementen bij bevochtiging te simuleren. In (Straube (2009)) worden enkele van deze computer simulatie programma's opgesomd, besproken en onderling vergeleken. Zo kan er bijvoorbeeld voor een verschillende drijfkracht geopteerd worden om het vochttransport te beschrijven, een andere manier om de sorptie-isotherm te beschrijven...

In (Kalamees & Vinha (2002)) worden drie van die computer simulatie programma's (*1D-HAM*, *MATCH* en *WUFI-2D*) vergeleken met werkelijke metingen. De berekende resultaten kwamen daarbij goed overeen met deze gemeten voor een lange periode. Als er een verschil is tussen de berekende en de gemeten resultaten, dan is dit te wijten aan één van volgende feiten (Kalamees & Vinha (2002)):

- Grenscondities verschillen sterk in de tijd, zoals bijvoorbeeld in de lente of op de zuid muur.
- Opgemeten waarden zijn gevoeliger aan vochtverandering.

- Materiaal karakteristieken zijn afhankelijk van de omgevingscondities zoals temperatuur en relatieve vochtigheid. Aangezien het niet mogelijk is alle karakteristieken perfect te bepalen, worden enkele vereenvoudigingen en benaderingen gemaakt.
- De correctheid van de metingen.

Desondanks de verschillen tussen de metingen en de berekeningen komen de resultaten bij de drie computer simulatie programma's goed overeen met de gemeten resultaten.

Naast dergelijke simulatie programma's die luchttransport invoeren door constante warmte- en massaovergangscoefficienten in te voeren als rondcondities, bestaan er ook programma's die door gebruik te maken van CFD (Computational Fluid Dynamics) de luchtstromen nauwkeurig oplossen. Doordat deze luchtstromen per tijdsstap telkens moeten opgelost worden, vraagt dit een grote rekenkracht van de computer. Desondanks de grote rekenkracht is de toepassing ervan in de bouwwereld de laatste jaren toch sterk toegenomen door de grote nauwkeurigheid.

2.4.1 Onderzoek naar spouwmuren gebruik makende van CFD

In het laatste decennium is de toepassing van CFD in de bouwwereld sterk toegenomen. Men kan door gebruik te maken van CFD luchtstromingen in ruimtes en warmtetransport doorheen bouwconstructies bestuderen. In (Nore *et al.* (2009)) wordt er bijvoorbeeld via drie dimensionale CFD-simulaties een analyse gemaakt van de luchtstroom in dunne geventileerde spouwen. Hierbij worden de snelheidsprofielen en de ventilatievouden beoogd bij verschillende spouwopbouwen, windsnelheden en windrichtingen.

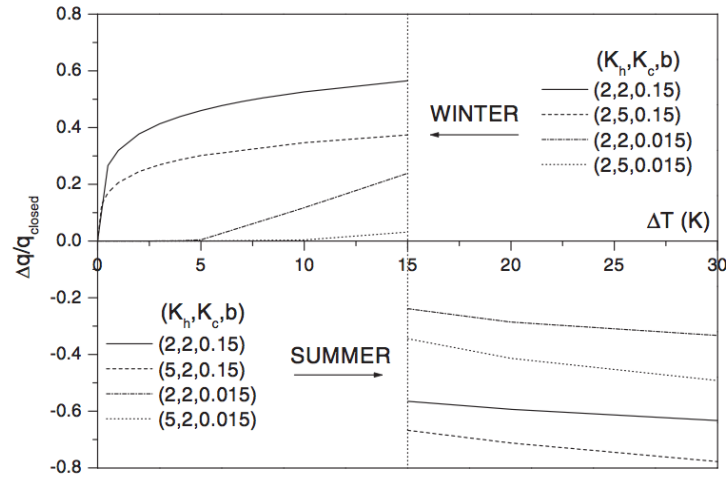
Aangezien er voor spouwmuren oneindig veel verschillende configuraties mogelijk zijn en al die configuraties een ander gedrag van het constructiemateriaal veroorzaken, is het praktisch om via CFD dit specifieke gedrag te kunnen voorspellen.

Warmtetransport

Natuurlijke en gedwongen convectie in de spouw hebben een grote invloed op het warmtetransport over de spouwmuur: in de zomer zullen de warmtewinsten verminderd worden en in de winter zullen er dan mogelijk extra warmteverliezen optreden. Dit effect wordt via een CFD-simulatie geïllustreerd in (Rodrigues & Aelenei (2009)).

In (figuur 2.4) wordt het bijkomende verschil (Δq) in warmtestroom getoond bij een geventileerde spouw ten opzichte van een niet-geventileerde spouw (q_{closed}). Deze figuur beaamt wat er hier boven werd geschreven. Zo is er een extra warmtestroom in de winter van binnen naar buiten en een kleinere warmtestroom in de zomer van buiten naar binnen. Hierbij is K_h de warmteweerstand van de wand aan de warme zijde, K_c de warmteweerstand aan de koude zijde en b de breedte van de spouw [m]. Voor de winter condities wordt een maximum

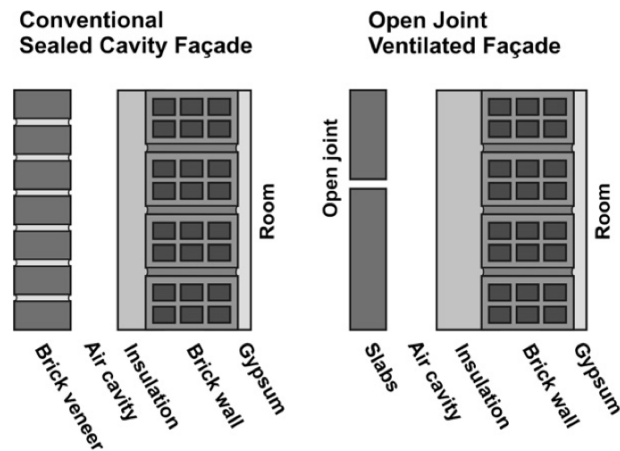
temperatuurverschil tussen binnen en buiten van $15K$ gebruikt en voor de zomer condities, als gevolg van invallende zonnestraling op het buitenoppervlak, worden er grotere temperatuurverschillen verondersteld.



Figuur 2.4: Verschil in warmtestroom tussen een geventileerde en niet-geventileerde spouw in zomer en wintercondities (Rodrigues & Aelenei (2009))

Naast Rodrigues en Aelenei (Rodrigues & Aelenei (2009)) bestudeerden ook Gustavsen samen met Thue (Gustavsen & Thue (2007)) en Gan (Gan (2011)) het effect van natuurlijke convectorie op het warmtetransport in spouwmuren.

Naast de gewone spouwmuur is er ook nog de sterk geventileerde open *rainscreen*-spouwmuur (figuur 2.5). In (Sanjuan *et al.* (2011b)) werd er aan de hand van een CFD-simulatie een studie gemaakt naar het verschil tussen een traditionele spouwmuur en deze sterk geventileerde open *rainscreen*-spouwmuur. In tegenstelling tot (Rodrigues & Aelenei (2009)) wordt hier gebruik gemaakt van een drie-dimensionale CFD-simulatie. Bij een open *rainscreen*-spouwmuur zijn er in het buitenspouwblad meer openingen voorzien, waardoor er grotere luchtstromen in de spouw voorkomen. Deze luchtstromen zorgen voor extra warmtewinsten of -verliezen.



Figuur 2.5: Dwarsdoorsnede van een traditionele spouwmuur en een open *rainscreen*-spouwmuur (Sanjuan *et al.* (2011b))

Hierbij constateerde men grote energie winsten in klimaten met hete zomers en zachte winters, doordat in de zomer de ontvangen extra warmtewinsten als gevolg van de invallende zonnestraling worden afgevoerd, waardoor de koellasten gereduceerd worden. De toepassing om in westerse gebieden met minder hete zomers gebruik te maken van deze open *rainscreen*-spouwmuren op bijvoorbeeld de zuid- en de westgevel is hiervoor een goed voorstel, omdat deze gevels de meeste zonnestraling ontvangen en dus de meeste warmtewinsten.

In (Stovall & Karagiozis (2005)) wordt via een gekoppeld CFD/HAM-model de relatie tussen de weersomstandigheden en de luchtsnelheid bestudeerd voor verschillende configuraties van spouwmuren met een buitenspouwblad uit metselwerk. Hier gebruikt men CFD om enkel momentopnames te bestuderen en uit deze resultaten een bepaalde trend af te leiden. Zo veranderen bijvoorbeeld bij breedtes van de spouw tussen 19 en 50 mm de massastromen niet significant. Daarentegen verdubbelt de stroom bij het verdubbelen van de grootte van de instroom openingen. Deze resultaten komen sterk overeen met die uit (Sanjuan *et al.* (2011b)): hoe groter de ventilatie openingen, hoe groter de luchtstromen in de spouw. De luchtsnelheid in de spouw wordt dus bepaald door de spouwconfiguratie, de winddruk en de opwaartse druk ten gevolge van de temperatuur. In dit artikel wordt er tevens geen rekening gehouden met de lange golfstraling in de spouw als vorm van warmtetransport en wordt er enkel *steady-state* gerekend.

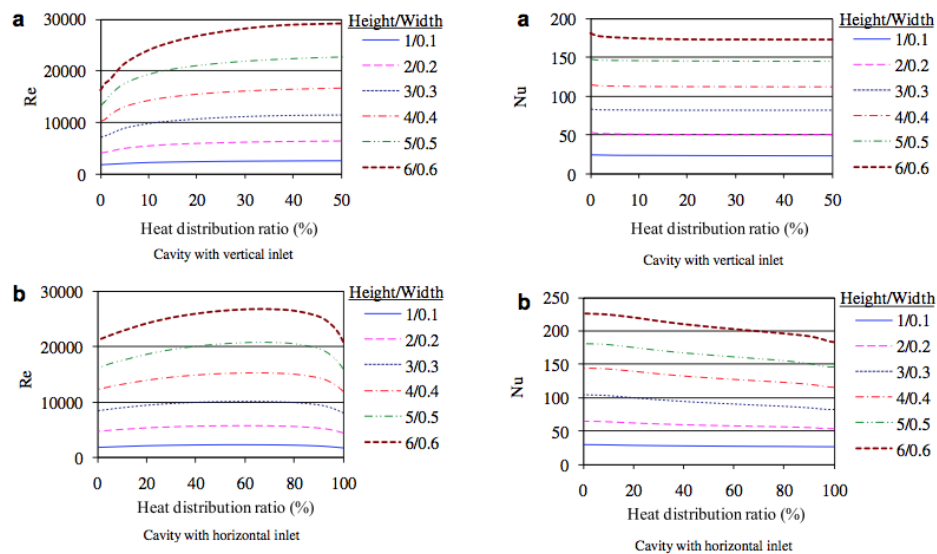
In (Debbissi *et al.* (2000)) werd er een numeriek onderzoek gedaan naar gekoppeld warmte- en vochttransport bij natuurlijke convectie tijdens verdamping van vocht in een verticaal kanaal symmetrisch opgewarmd door een uniforme warmte flux door het in rekening brengen van warmtetransport door langgolvige straling tussen platen. Hierbij wordt dan telkens

het snelheids- en temperatuursprofiel over de breedte van de spouw bestudeerd. Dit is een uitzondering in de artikels die langegolf straling tussen de spouwbladen in rekening brengt.

In (D.Gossard *et al.* (2011)) wordt een Nusselt correlatie ontwikkeld in luchtspouwen met laminaire, natuurlijke convectorie. Het Nusselt-getal is een dimensieloos getal voor de grootte van de overgangscoefficienten. In (D.Gossard *et al.* (2011)) varieert het Rayleigh-getal tussen de 10^3 en 10^5 voor verschillende breedte-hoogte verhoudingen van de spouw. Het resultaat toont dat de breedte van de luchtspouw een meetbare invloed heeft op driedimensionale warmte transport fenomenen: het Nusselt-getal voor een twee-dimensionale simulatie is wat groter dan voor een drie-dimensionale simulatie.

In de bouwfysica is het temperatuurverschil tussen een materiaal en lucht vaak klein. In (Drzik *et al.* (2012)) worden experimentele, analytische en numerieke analyses van de grenslagen op een verticale plaat gedaan bij lage temperatuurverschillen. Bij grotere temperatuurverschillen was er een betere overeenkomst met de data uit CFD simulaties dan bij kleinere temperatuurverschillen.

Voor CFD-simulaties worden vaak als vereenvoudiging verticale inlaten gebruikt in plaats van horizontale. Gan (Gan (2011)) bestudeerde het verschil tussen de toepassing van een horizontale inlaat en een verticale inlaat bij pure natuurlijke convectorie in spouwmuren bij verschillende warmte verdeling ratio's q_r ($q_r = q_2/(q_1 + q_2)$, met q_1 de warmteflux van binnen naar de spouw en q_2 de warmteflux van buiten naar de spouw) op de waarde van het Reynolds-getal en het Nusselt-getal. Het Reynolds-getal is hier een dimensieloos getal voor de grootte van de stroomsnelheid en het Nusselt-getal voor de grootte van de warmte overgang. De resultaten voor een warmteflux (q_2) van 1000 W/m^2 worden getoond in (figuur 2.6).



Figuur 2.6: Effect van het warmte verdeling ratio op de stroomsnelheid en de warmte overgangscoefficiënt (Gan (2011))

Hierbij is voor spouwen met een horizontale inlaat de luchtstroom kleiner (Re) is dan bij spouwen met een verticale inlaat en de warmteovergang (Nu) bij spouwen met een horizontale inlaat in het algemeen hoger is dan bij een verticale inlaat. De verschillen kunnen wel niet als noemenswaardig bestempeld worden. Hier wordt CFD dus gebruikt om de verandering van de warmteovergangscoefficiënt over de hoogte van het spouwvlak te bepalen en om de convectieve luchtstromen als gevolg van de temperatuurverschillen te simuleren.

Het verschil tussen een drie-dimensionale en een twee-dimensionale CFD-simulatie van een luchtspouw wordt bestudeerd door Gustavsen en Thue (Gustavsen & Thue (2007)). Hierbij wordt het verschil tussen de resultaten van een drie-dimensionale en een twee-dimensionale CFD-simulatie van een luchtspouw bestudeerd voor natuurlijke convectie in kanalen. Het verschil tussen deze resultaten was afhankelijk van de breedte-hoogte verhouding van die kanalen. Hieruit werden dan afhankelijk van de breedte-hoogte verhouding bepaald of drie-dimensionale effecten overheersen of niet. Voor een traditionele spouwmuur mag men er van uitgaan dat twee-dimensionale effecten overheersen tegenover de drie-dimensionale effecten.

Vochttransport

Commerciële CFD-programma's zoals *Fluent* zijn dus in staat om warmtetransport te simuleren, maar kunnen standaard geen vochttransport doorheen poreuze materialen simuleren. Als gevolg van deze beperking zijn er slechts weinig artikels die vochttransport doorheen muren simuleren, door gebruik te maken van CFD.

De meeste commerciële CFD-programma's beschrijven dus het transport van damp in poreuze materialen niet. In (Steeman (2009)) werd er een gekoppeld CFD/HAM-model ontwikkeld om het risico op schade fenomenen door cyclische krimp of uitzetting te voorspellen. Dit model gebruikt een commercieel CFD-programma, *Fluent*, om de Navier-Stokes vergelijkingen in de lucht op te lossen. Een bijkomend aantal vergelijking werd daarbij toegevoegd aan het model om het warmte- en vochttransport in hygroscopisch, poreuze materialen op te lossen. Een meer uitgebreide beschrijving van deze bijkomende vergelijkingen wordt gevonden in (Steeman (2009)). De beperking van dit model is dat het naast warmtetransport en luchtstromen enkel damptransport beschrijft en geen vloeibaar vochttransport. Er kunnen dus geen condensatieproblemen meegesimuleerd worden.

Het vochtmodel beschrijft het damptransport in functie van de massafractie (Y). Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld *WUFI-2D* waarbij de relatieve vochtigheid als drijfkracht gebruikt wordt voor zowel het damp- als vloeibaar vochttransport. Voor een gedetailleerde achtergrond over de drijfkrachten voor spouwventilatie wordt verwezen naar (Straube (2009)). De relatieve belangrijkheid van de drijfkrachten onderling wordt in (Straube (2009)) in detail vergeleken.

Naast het beperkt aantal CFD-simulaties voor vochttransport worden er veel experimenten uitgevoerd naar het vochtgedrag van constructies. Deze experimenten worden dan gebruikt om ontwikkelde HAM-modellen te valideren of om bepaalde correlaties af te leiden. Uit enkele van die experimenten blijkt net als uit voorgaande CFD-simulatie (Stovall & Karagiozis (2005)) dat de droging versnelt wordt bij een geventileerde spouw (Hens & Janssens (2007)).

Ook aan de KU Leuven worden experimenten gedaan naar het vochtgedrag van lichtgewicht gevelelementen. Deze gegevens worden dan tevens gebruikt om HAM-modellen te valideren. Deze experimenten liepen over een periode van twee jaar (Desta *et al.* (2010)). Hieruit kon men besluiten dat de hoeveelheid geabsorbeerd vocht proportioneel was met de dampdoorlatendheid van de binnenafwerking. Bij een luchtdichte afwerking was de hoeveelheid opgestapeld vocht in de winter beperkt en droogde voldoende uit in de zomer. Gelijkaardig als in het Vliet in Leuven deed men in (Piot *et al.* (2011)) ook testen naar het hygrothermisch gedrag van gebouwen opgebouwd uit houtskeletbouw en in (Mao *et al.* (2009)) werden verschillende configuraties van lichtgewicht gevelelementen getest op hun vochtgedrag na regeninfiltratie om daaruit de *In-Cavity Evaporation Allowance* te kunnen bepalen als een soort van richtlijn. Hieruit blijkt dat vocht niet enkel een gevolg is van regendoorslag, maar ook van dampdiffusie en convectief damptransport.

Door het uitvoeren van experimenten en computer simulaties wordt de theorie ook uitgebreid. In (Davidovic *et al.* (2005)) wordt een vergelijking ontwikkeld om het convectief vochttransport in spouwmuren te voorspellen. Deze vergelijking is ontwikkeld voor twee-dimensionale

laminaire stromingen met een uniform snelheidsprofiel in de spouw, maar kan ook toegepast worden voor dynamische droogprocessen met veranderende omgevingscondities. De vergelijking vertoonde ook goede resultaten voor transiënte droogprocessen van maximaal 5 minuten. De resultaten zijn dus niet altijd 100% nauwkeurig, maar kunnen wel een goede richtlijn geven.

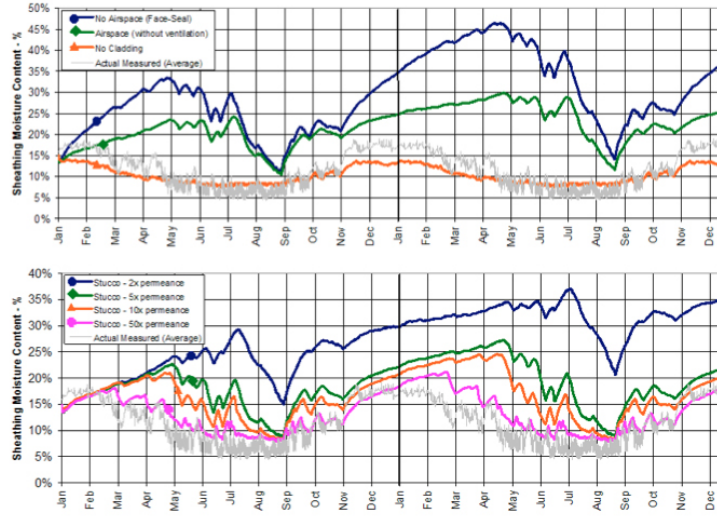
2.4.2 Onderzoek naar spouwmuren gebruik makende van *WUFI*

In de praktijk worden programma's zoals *Fluent* minder gebruikt om geventileerde spouwen te simuleren, omdat deze een grote rekentijd hebben, een complexere gebruikersinterface hebben en een uitgebreide voorkennis verwachten. Gebruiksvriendelijke HAM-modellen (Heat, Air and Moisture) daarentegen worden in de praktijk meer gebruikt.

Deze modellen laten het ook toe om een geventileerde spouw te simuleren. De technieken om dergelijke geventileerde spouwmuren te simuleren in HAM-modellen is in de loop van de tijd onderzocht en aangepast geweest. Deze verschillende technieken zijn de volgende:

- Het effect van ventilatie negeren.
- Werken met een effectieve damp permeabiliteit van het buitenspouwblad. De grootte ervan wordt bepaald afhankelijk van de voorspelde ventilatievouden.
- Verwijderen van het buitenspouwblad. Deze methode houdt geen rekening met de straling en de regen, waardoor deze methode een onderschatting is van de werkelijke vochtbelasting.
- De spouwcondities (relatieve vochtigheid en temperatuur) als grenscondities gebruiken. Deze moeten dan eerst opgemeten worden in de spouw en in een *.kli*-file verwerkt worden. Deze methode kan dus enkel gebruikt worden indien er meetdata beschikbaar is.

Bij vergelijking van de resultaten van de eerste drie voorgestelde methoden bij een identieke case, dan benadert de tweede methode het best de gemeten waarden. De slechtste resultaten worden bekomen bij het toepassen van geen luchtspouw of een luchtspouw zonder ventilatie (figuur 2.7).



Figuur 2.7: Vergelijking van de verschillende modelleringstechnieken met de gemeten resultaten voor een identieke case (Straube & Finch (2009))

In (Karagiozis & Kuenzel (2009)) wordt er een vijfde benadering voorgesteld om het effect van een geventileerde spouw te simuleren en wordt in één-dimensionale gevallen onderzocht. Het wordt via deze benadering mogelijk om zowel met binnen- als buitenlucht te ventileren. Het doel was om de ingewikkelde drie-dimensionale stromingseffecten die zich voordoen in de spouw te vereenvoudigen naar één allesomvattende term, een bronterm.

Zowel in de warmtetransportvergelijking als de massatransportvergelijking komt er een bronterm voor de spouwlucht bij:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot q + S_h \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot (g_w + g_v) + S_w \quad (2.35)$$

Met S_h de bronterm voor warmte:

$$S_h = h \nabla g_v + Q_{air} \cdot \rho \cdot (h_e - h_{cav}) + Q_s \text{ [W/m}^3\text{]} \quad (2.36)$$

Met h de latente warmte bij fase verandering [J/kg], g_v de dampflux [kg/m^2s], Q_{air} het ventilatievoud [$1/h$], h_e de enthalpie van lucht aan de inlaat [J/kg], h_{cav} de enthalpie van lucht aan de uitlaat [J/kg] en Q_s de bijkomende warmtebron of -put [J/m^3s]. En S_m de bronterm voor massa:

$$S_m = Q_{air} \cdot (\rho_e - \rho_{cav}) + Q_{penetratie} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (2.37)$$

Met ρ_e de massadichtheid van lucht aan de inlaat [kg/m^3] en ρ_{cav} de massadichtheid van lucht aan de uitlaat [kg/m^3]. Bij het testen van het model werd een constant ventilatievoud van 50 1/h gebruikt. Na vergelijking van de resultaten van de berekeningen uit *WUFI* met de gemeten resultaten, zag men een goede tot excellente overeenkomst met de metingen.

De enige input die moet ingegeven worden in *WUFI* is het ventilatievoud Q_{air} , daaruit worden dan de brontermen voor warmte en massa bepaald. Deze bronterm kan bekomen worden uit één van volgende formules:

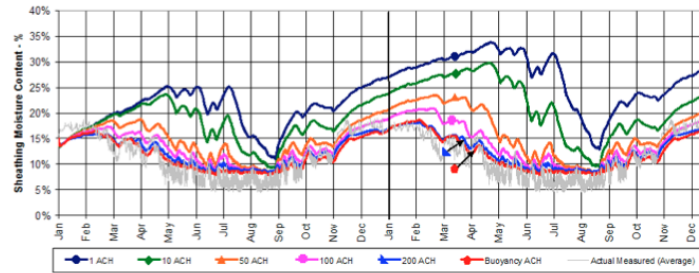
$$Q_{air} = \frac{Q}{V} \quad (2.38)$$

of:

$$Q_{air} = \frac{v \cdot 3600}{h} \quad (2.39)$$

Met Q het debiet [m^3/h], V het volume [m^3], v de snelheid [m/s] en h de hoogte van de spouw.

In (Straube & Finch (2009)) wordt deze vijfde techniek ook nog eens vergeleken met meetresultaten en toont net als in (Karagiozis & Kuenzel (2009)) excellente overeenkomsten (figuur 2.8).



Figuur 2.8: Vergelijking van de modelleringstechnieken met de warmte en vochtbronnen met de gemeten resultaten voor een identieke case (Straube & Finch (2009))

Voor deze simulatie techniek is een jaargemiddelde ventilatievoud voldoende. Een ventilatievoud per uur is wel meer nauwkeurig, maar deze extra inspanning is het volgens de auteur niet waard. In (Salonvarra *et al.* (2007)) wordt deze modelleringstechniek in *WUFI* ook gebruikt om algemene effecten van spouwventilatie te beschouwen.

Voor *WUFI-2D* werd in het oorspronkelijke model nog anders tewerk gegaan (Karagiozis & Kuenzel (2009)). Voor de grenscondities van de spouwvlakken bij een geventileerde spouwmuur heeft men de omstandigheden van het buitenklimaat nodig, doordat er wordt geventileerd met buitenlucht. Daardoor werden de buitencondities op de spouwbladen toegepast. Aangezien er geen directe zonnestraling invalt op de spouwbladen, werd de absorptiefactor

gelijk gesteld aan nul. Ook zal er geen regen invallen op deze spouwbladen, waardoor de *rain reduction factor* tevens gelijk gesteld wordt aan nul. Hierbij moet er wel opgemerkt worden dat het effect van de langegolf straling in de spouw en de mogelijke onderlinge invloed tussen de spouwbladen niet in rekening wordt gebracht.

Net zoals *WUFI-2D* heeft het National Research Council Canada in samenwerking met het Institute for Research in Construction ook een HAM-model ontwikkeld: *hygIRC-C*. Dit model is voorlopig nog niet commercieel te verkrijgen. In (Saber (2011)) wordt dit model gebruikt om het effect van reflecterende isolatie in spouwen te begroten op vlak van thermische isolatie. Hierbij werden verschillende emissie-factoren (0,2 tot 0,9), hellingen van de spouw (0, 30, 45 en 90 graden) en randcondities vergeleken. De resultaten van deze tests waren gelijkaardig met werkelijk gemeten waarden. Ook de stromingsfenomenen voor verschillende hellingen van de spouw en verschillende randcondities worden er in beeld gebracht. Zo zijn de stromingsfenomenen anders bij opwarming onderaan dan bovenaan bij bijvoorbeeld éénzelfde hellingsgraad.

Naast HAM-modellen zoals *WUFI* en *hygIRC-C* is *DELPHIN* ook een vaak gebruikt model dat commercieel te verkrijgen is. In (Gnoth *et al.* (2008)) wordt er door gebruik te maken van een koppeling tussen een CFD-solver en *DELPHIN* het warmte- en vochttransport in een spouwmuur gesimuleerd. Zo lost men door gebruik te maken van CFD de luchtstromingen en het warmte- en vochttransport op in de spouw en worden de randcondities (temperatuur en relatieve vochtigheid) aan de interface tussen het materiaal en de lucht bepaald door *DELPHIN*. Na elke iteratie worden de data tussen beide programma's uitgewisseld door een *data interface*, waardoor de resultaten uit het ene programma als randconditie dienen voor het andere programma. Het een correctere manier van werken dan wanneer men enkel gebruik maakt van hygro-thermische simulatie software, aangezien de randcondities correcter zijn in de tijd en de ruimte.

2.5 Bedenkingen

Uit de literatuurstudie kunnen enkele korte besluiten/bedenkingen geconcludeerd worden:

Eerst en vooral worden commerciële CFD-programma's zoals *Fluent* standaard vaak enkel gebruikt om luchtstromen en warmtetransport te simuleren en geen vochttransport.

Ten tweede wordt bij het simuleren van warmtetransport in spouwmuren met CFD de langegolf straling in de spouw vaak niet meegesimuleerd. Nochtans wordt in (Steeman (2009)) gewezen op de invloed van langegolf straling op de droging van materialen.

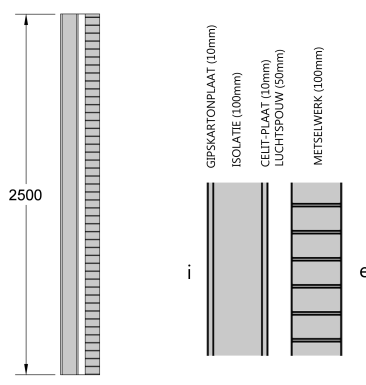
Ten derde is de recentste modelleringstechniek in *WUFI* om een geventileerde spouw te simuleren niet exact. Het voordeel aan dit model is echter wel dat het vocht- en warmtetransport van het ene naar het andere spouwblad in rekening wordt gebracht. Bij het werken met een constante overgangscoefficiënt zoals oorspronkelijk werd gedaan in *WUFI-2D* om een geventileerde spouw te simuleren is dit niet het geval. Hier berekent men enkel de warmte- en massaverliezen uit de spouwbladen, maar niet de wederzijdse beïnvloeding tussen de spouwbladen.

Ten laatste moet er om het warmte- en vochttransport in spouwmuren te bestuderen gesimuleerd of getest worden over een langere periode. De rekenkracht van de computers van vandaag daarentegen laat niet toe om aan de hand van CFD-simulaties langere periodes van bijvoorbeeld een jaar te simuleren. Aan de hand van het gekoppeld CFD/HAM-model kan wel de nauwkeurigheid van het model in *WUFI* om een geventileerde spouw te simuleren onderzocht worden.

2.6 Doel van de masterproef

In deze masterproef is het de bedoeling een hygrothermische evaluatie van een spouwmuur uit te voeren. Hiervoor worden twee simulatie modellen gebruikt en vergeleken: enerzijds een gekoppeld CFD/HAM-model (Steeleman (2009)) en anderzijds *WUFI-2D*.

De te onderzoeken spouwmuur wordt opgebouwd zoals in (figuur 2.9) .



Figuur 2.9: Opbouw van de te onderzoeken spouwmuur.

De materiaalkenmerken zijn terug te vinden in (bijlage B). Voor de spouwconfiguratie wordt een spouwbreedte van 5 cm verondersteld, aangezien dit de minimum breedte is bij spouwmuur met een buitenspouwblad uit metselwerk (Chown *et al.* (2011)). Voor de inlaatsnelheid wordt een snelheden van 0,2 m/s gebruikt. Dit is een gemiddelde snelheid in een spouwmuur met een spouwbreedte van 5 cm en een buitenspouwblad opgebouwd uit metselwerk (Straube (2009) en Janssens (1997)).

Eerst wordt er ingegaan op de achtergrond van enerzijds het gekoppeld CFD/HAM-model en anderzijds *WUFI-2D*, de vereenvoudigingen die erin worden gemaakt en de verschillen tussen beide. Erna wordt er aan de hand van een identieke simulatie in het gekoppeld CFD/HAM-model en *WUFI-2D* onderzocht of er een verschil is tussen de resultaten uit het beide programma's, als een gevolg van een mogelijke vereenvoudiging in de warmte- en vochttransportvergelijkingen.

In het tweede deel worden, door gebruik te maken van een gekoppeld CFD/HAM-model (Steeleman (2009)), de snelheidsprofielen en het warmte- en vochttransport in de spouwmuur geanalyseerd. Om deze algemene trends te onderzoeken wordt er gesimuleerd over korte periodes (uren of dagen) of *steady state* aan de hand van het gekoppeld CFD/HAM-model. Hierbij

worden voor verschillende randcondities (zomer en winter) de snelheidsprofielen, de overgangscoefficienten en de toepasbaarheid van de warmte/massa-analogie geanalyseerd. Hiervoor wordt het reeds ontwikkeld CFD/HAM-model aan de UGent (Steeman (2009)) aangepast om een twee-dimensionale spouw te simuleren.

Hierop voortbouwend wordt de invloed van de langegolf straling in de luchtspouw op vlak van warmte- en vochttransport over de spouwmuur onderzocht aan de hand van het aangepaste CFD/HAM-model.

Daarna wordt uit de bekomen fysische inzichten in een geventileerde spouw de correctheid van het model in *WUFI-2D* om een geventileerde spouw te simuleren onderzocht door in beide simulatieprogramma's identieke cases te simuleren.

In het voorlaatste hoofdstuk worden beide simulatieprogramma's gebruikt om de invloed van het buitenspouwblad op het binnenspouwblad te onderzoeken. Om dit hoofdstuk af te sluiten wordt aan de hand van een jaarsimulatie in *WUFI-2D* het verschil onderzocht tussen een geventileerde en een niet geventileerde luchtspouw.

In het laatste hoofdstuk worden de mogelijkheden van het gekoppeld CFD/HAM-model onderzocht. Het model wordt aangepast om simulaties over langere periodes met variabele randcondities teneinde waarheidsgetrouwe simulaties te kunnen uitvoeren. Om de mogelijkheden van dit gekoppeld CFD/HAM-model te illustreren wordt het verschil onderzocht tussen de toepassing van een *Celit*-plaat en een OSB-plaat voor de afwerking van de isolatie en de invloed van een dampscherm op vlak van warmte- en vochttransport over de spouwmuur, om zo het risico om schimmelgroei te kunnen begroten.

Hoofdstuk 3

Gekoppeld CFD/HAM-model en *WUFI-2D*

In dit eindwerk wordt er gebruik gemaakt van het CFD programma (*Computational Fluid Dynamics*) *Fluent* voor het gekoppeld CFD/HAM-model en *WUFI-2D* van het HAM (Heat, Air and Moisture) simulatie pakket. Om deze programma's minder exotisch in de oren te doen klinken, wordt er eerst ingegaan op de achtergrond van deze twee simulatieprogramma's, de vereenvoudigingen die erin worden gemaakt en de verschillen tussen beide.

In het tweede deel van dit hoofdstuk wordt er aan de hand van een identieke simulatie in het gekoppeld CFD/HAM-model en *WUFI-2D* onderzocht of er een verschil is tussen de resultaten uit het beide programma's, als een gevolg van een mogelijke vereenvoudiging in de warmte- en vochttransportvergelijkingen.

3.1 Achtergrond

Het gekoppeld CFD/HAM-model gebruikt een commercieel CFD-programma, *Fluent*, om de Navier-Stokes vergelijkingen in de lucht op te lossen. Een bijkomend aantal vergelijking wordt daarbij toegevoegd aan het model om het warmte- en vochttransport in hygroscopisch, poreuze materialen op te lossen. Deze vergelijkingen worden dan via UDF's (*User Defined Functions*) geladen in de *Fluent-solver*. Deze UDF's worden geschreven in C-programmeertaal. Een meer uitgebreide beschrijving van deze bijkomende vergelijkingen wordt gevonden in (Steeman (2009)). Voor de algemene achtergrond van *Fluent* wordt verwezen naar de handleiding van *Fluent* (Ansys (2011)) en voor *WUFI-2D* naar (Künzel (1995b)).

3.2 Verschillen

Een eerste verschil tussen het gekoppeld CFD/HAM-model en *WUFI-2D* is dat het gekoppeld CFD/HAM-model luchtstromingen in rekening brengt. In *WUFI-2D* worden de stroming-conditions ingevoerd als randvoorwaarden in de vorm van overgangscoefficienten, zowel voor warmte- als vochttransport.

Een tweede verschil is dat het geïmplementeerde model in *Fluent* enkel de damptransport vergelijking oplost en niet de vergelijking voor vloeistoftransport. Voor meer achtergrond informatie wordt verwezen naar (sectie 2.3).

In tegenstelling tot het warmtetransport dat beschreven wordt in functie van één drijfkracht, de temperatuur, kan voor het vochttransport gekozen worden tussen verschillende drijfkrachten. In het gekoppeld CFD/HAM-model wordt geopteerd voor de massafractie ($Y = \frac{\rho_v}{\rho} = \frac{p_v}{\rho R_v T}$).

In *WUFI* wordt er beslist dat er voor het vochttransport in poreuze stoffen twee onafhankelijke drijvende krachten nodig zijn: de dampdruk en de capillaire zuiging (Künzel (1995a)). De dampdruk wordt gebruikt om het damptransport te beschrijven en de capillaire zuiging om het vloeibaar vochttransport te beschrijven. Door toepassing van de wet van Kelvin kan de capillaire zuiging herschreven worden in functie van de relatieve vochtigheid. Hetzelfde kan gebeuren voor de dampdruk volgens de algemene formule van de relatieve vochtigheid (φ):

$$p_v = p_{sat} \cdot \varphi \quad (3.1)$$

Met voor p_{sat}

$$p_{sat} = 611 \exp\left(\frac{17,08(T - 273,1 + 5)}{(T - 38,97)}\right) \quad (3.2)$$

Met T de temperatuur [K]. Dus voor *WUFI* kan zowel het damp- als het vochttransport geschreven worden in functie van de relatieve vochtigheid (φ).

Een laatste verschil ligt op het vlak van gebruiksgemak. Zo wordt er in *WUFI-2D* gebruik gemaakt van een gebruikersinterface, die het invoeren van gegevens en randcondities makkelijker maakt. In het gekoppeld CFD/HAM-model wordt gebruik gemaakt van UDF's om de randcondities te bepalen en de transportvergelijkingen te beschrijven (Steeman (2009)).

3.3 Vereenvoudigingen in het gekoppeld CFD/HAM-model

Het gekoppeld CFD/HAM-model gebruikt minder vereenvoudigingen aangezien het naast warmte- en vochttransport ook luchtstromingen in rekening brengt. Een vereenvoudiging is wel dat er in het ontwikkelde model enkel rekening gehouden wordt met convectieve luchtstromingen rond de materialen en niet in de materialen, doordat deze convectieve luchtstromen

voor het moment nog moeilijk te beschrijven zijn, aangezien dit sterk drie-dimensionale fenomenen zijn.

Het uitrekenen van deze luchtstromen door het gekoppeld CFD/HAM-model vraagt een grote rekenkracht van de computers. Daarom is men vaak genoodzaakt te werken met een *server*, waardoor er parallel gewerkt wordt op meerdere processoren tegelijk om zo de rekentijd binnen de perken te houden. Het is niet zo dat door gebruik te maken van een oneindig aantal processors de rekentijd naar nul convergeert. Daar zit een limitatie op. Het gebruik van gekoppeld CFD/HAM-model voor het simuleren van lange periodes is dus met de rekenkracht van de huidige computers onmogelijk. De toepasbaarheid wordt dus beperkt tot *steady-state* cases en simulaties over kortere periodes. In het huidige gekoppeld CFD/HAM-model (Steeman (2009)) is het standaard nog niet mogelijk parallel te rekenen.

3.4 Vereenvoudigingen in WUFI-2D

Door de lange periodes van bevochtiging en droging van een spouwmuur is het handig als er gesimuleerd kan worden over langere periodes. Hierdoor moeten deze hygrothermische processen vereenvoudigd worden, zodat ze evenredig zijn met de rekenkracht van de computers van vandaag. WUFI-2D gebruikt zo enkele vereenvoudigingen.

Een eerste vereenvoudiging in WUFI-2D is dat er geen rekening wordt gehouden met convectieve luchtstromen in de poreuze bouwcomponenten, net zoals bij het gekoppeld CFD/HAM-model. Op vlak van vloeibaar vochttransport wordt er geen rekening gehouden met stromingen onder invloed van de zwaartekracht of hydraulische druk, electrokineses en osmose, tevens net zoals bij het gekoppeld CFD/HAM-model. De grootte van de invloed van deze laatste twee blijft echter wel beperkt.

Een tweede vereenvoudiging is dat bij materialen met een uitgesproken hysteresis in hun vochttopslagfunctie, WUFI-2D daar geen rekening mee houdt. Zo zal er bij het vloeibaar vochttransport wel een verschillende adsorptie en desorptie isotherm worden gebruikt, maar voor het damptransport slechts één enkele sorptie-isotherm voor adsorptie en desorptie. Voor de achtergrond rond hysteresis wordt verwezen naar (sectie 2.2.2). In de literatuur wordt hieromtrent sterk discussie gevoerd. Zo zou volgens Pedersen hysteresis slechts een kleine impact hebben op het resultaat van een simulatie. Karagiozis daarentegen toonde aan via parametrisch modelleren dat hysteresis belangrijk is voor de juiste voorspelling in bepaalde toepassingen (Straube (2009)).

Ten derde wordt de invloed van ijsvorming op de thermische geleiding niet opgenomen hoewel haar invloed op de enthalpie en het vloeibaar transport wel in rekening wordt gebracht.

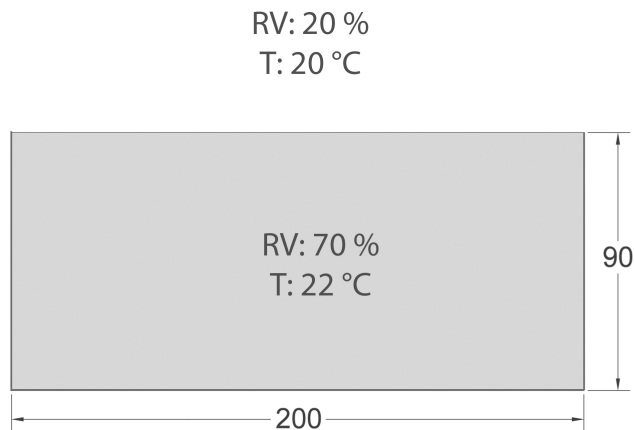
Een laatste vereenvoudiging is het feit dat men werkt met een vereenvoudiging bij de waarden van de overgangscoefficienten en dat over een oppervlak één oppervlakte gewogen gemiddelde waarde wordt gebruikt voor de overgangscoefficienten.

3.5 Vergelijking van de transportvergelijkingen in het gekoppeld CFD/HAM-model en *WUFI-2D*

3.5.1 Randcondities

Om het verschil tussen de transportvergelijkingen in het gekoppeld CFD/HAM-model en *WUFI-2D* te beogen wordt in beide programma's een identieke case gesimuleerd.

De case bestaat uit een gipsblok waarvan drie wanden adiabatisch zijn en één wand grenst aan lucht met een bepaalde relatieve vochtigheid en temperatuur. Er wordt voor gips gekozen aangezien dat een hygroscopisch materiaal is, wat wil zeggen dat bij een lage relatieve vochtigheid het materiaal al een relatief hoog vochtgehalte heeft, dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld baksteen. De warmteovergangscoefficient aan het oppervlak is gelijk aan $23 \text{ W/m}^2\text{K}$. De afmetingen van het volume komen overeen met de gemiddelde afmetingen van een baksteen. Het volume heeft een temperatuur van $299,15 \text{ K}$ en relatieve vochtigheid van 70%, de omgevingslucht heeft een temperatuur van $293,15 \text{ K}$ en een relatieve vochtigheid van 20% (figuur 3.1).



Figuur 3.1: Randcondities

Eerst wordt de warmte/massa-analogie bepaald bij de gegeven randcondities. Vanuit deze analogie kan dan de massaovergangscoefficient bepaald worden uit de warmteovergangscoefficient.

3.5.2 Warmte/massa-analogie

Om de warmte/massa-analogie te bepalen voor bovenstaande randcondities ($RV = 20\%$, $T = 293,15K$) berekenen we eerst de massafractie van de lucht (Y), omdat deze nodig is om de massadichtheid van vochtige lucht (ρ_v) te berekenen. De gegevens die men hiervoor nodig heeft zijn: de saturatiedruk p_{sat} , de omgevingsdruk $p_g = 101325 \text{ hPa}$ en de dampdruk $p_v = p_{sat} \cdot \varphi$. Naast deze drukken zijn ook de waarden voor de verschillende gasconstanten en molaire massa's nodig (A).

De gasconstante van damp $\mathfrak{R}_v$ en lucht $\mathfrak{R}_{air}$:

$$\mathfrak{R}_v = 462 \text{ J/kgK} \quad (3.3)$$

$$\mathfrak{R}_{air} = 286,9 \text{ J/kgK} \quad (3.4)$$

De algemene gasconstante $\mathfrak{R}$:

$$\mathfrak{R} = 8,314 \text{ J/Kmol} \quad (3.5)$$

De molaire massa van water M_l en van lucht M_{air} :

$$M_l = 0,0179567 \text{ g/mol} \quad (3.6)$$

$$M_{air} = 0,02897874 \text{ g/mol} \quad (3.7)$$

Voor de massafractie in de lucht krijgen we dan:

$$Y = \frac{p_{sat}\varphi\mathfrak{R}_{air}}{p_g\mathfrak{R}_v - p_{sat}\varphi\mathfrak{R}_v + p_{sat}\varphi\mathfrak{R}_{air}} \quad (3.8)$$

en voor de massadichtheid van de vochtige lucht (ρ_v):

$$\rho_v = \frac{p_g}{\mathfrak{R}T \frac{Y}{M_l} + \frac{1-Y}{M_{air}}} \quad (3.9)$$

Uit de massadichtheid van de vochtige lucht halen we dan het Schmidt-getal (Sc):

$$Sc = \frac{\eta}{\rho_v D_v} \quad (3.10)$$

Met het Prandtl-getal Pr :

$$Pr = \frac{\eta C_p}{\lambda} \quad (3.11)$$

Voor de warmte/massa-analogie krijgen we dan (bijlage A(Chilton & Colburn (1934))):

$$\beta_p = \frac{1}{(\frac{Sc}{Pr})^{2/3} \rho_v C_p T \mathfrak{R}_v} \alpha \quad (3.12)$$

Toegepast op gegeven randcondities ($RV = 20\%$, $T = 293,15K$) krijgt men dan voor ($Le = 1$):

$$\beta_p = 6,11 \cdot 10^{-9} \alpha \quad (3.13)$$

en voor ($Le \neq 1$):

$$\beta_p = 7,01 \cdot 10^{-9} \alpha \quad (3.14)$$

Deze resultaten komen goed overeen met de eerder vermelde waarden uit de literatuur (sectie 2.2.2). Gebruik makende van $\beta_p = 7,01 \cdot 10^{-9} \alpha$ is β_p voor deze situatie gelijk aan $1,613 \cdot 10^{-7} \text{ s/m}$.

3.5.3 Input gekoppeld CFD/HAM-model en WUFI-2D

Input gekoppeld CFD/HAM-model

In het gekoppeld CFD/HAM-model worden de omgevingskenmerken van de lucht ingevoerd als enerzijds een warmteflux:

$$q_h = \alpha \Delta T \quad (3.15)$$

en anderzijds een massaflux:

$$g_v = \beta_Y \Delta Y \quad (3.16)$$

Met:

$$\beta_Y = \beta_p \mathcal{R}_v T \rho \quad (3.17)$$

volgens de ideale gaswet.

Input WUFI-2D

In WUFI-2D wordt dezelfde convectieve warmte- en massaovergangscoefficiënt, temperatuur en relatieve vochtigheid ingevoerd zoals in het gekoppeld CFD/HAM-model.

3.5.4 Grid- en tijdonafhankelijkheid

Om de rekentijd tot een minimum te beperken en toch de nauwkeurigheid van het resultaat te waarborgen wordt ervoor gezorgd dat het grid onafhankelijk is van het resultaat. Hiervoor wordt een iteratief proces gevolgd waarbij verschillende griddensiteiten gebruikt worden tot er quasi geen verandering van de resultaten meer is.

Als grid word er voor het gekoppeld CFD/HAM-model gebruik gemaakt van een regulier grid van 10x100. Voor WUFI-2D wordt evenals gebruik gemaakt van een regulier grid van 10x100. De griddensiteit wordt iteratief bepaald door de resultaten van verschillende griddensiteiten te vergelijken.

Voor de grootte van de tijdsstap wordt gekozen voor 60 seconden, aangezien een kleinere tijdsstap geen meer nauwkeurige resultaten geeft en vooral ook omdat het een herkenbare tijdsstap is.

De invloed van het convergentie criterium mag tevens niet over het hoofd gezien worden. Dit bepaald tevens de nauwkeurigheid van de oplossing. Hoe kleiner het convergentie criterium, hoe dichter de oplossing benaderd wordt. In WUFI-2D wordt het convergentie criterium op 10^{-9} genomen en in het gekoppeld CFD/HAM-model op 10^{-6} voor de snelheden en op 10^{-9} voor temperatuur en massafractie.

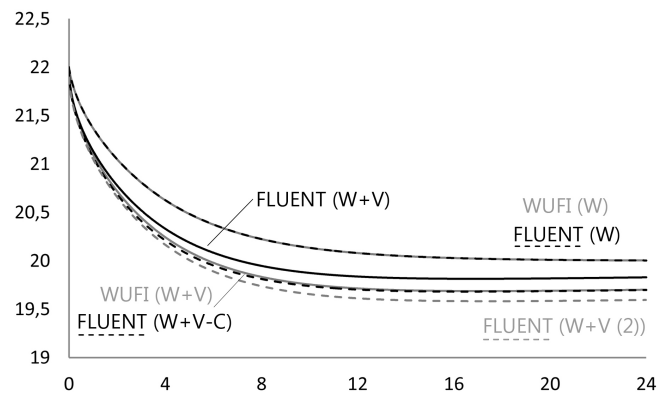
Voor het gekoppeld CFD/HAM-model en WUFI-2D wordt dus hetzelfde grid en dezelfde tijdsstap gebruikt.

3.5.5 Resultaten

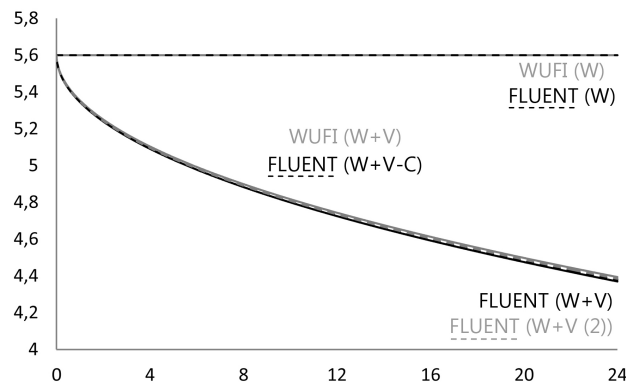
Voor de vergelijking tussen de transportvergelijkingen in het gekoppeld CFD/HAM-model en in *WUFI-2D* worden de resultaten met de eerder vermelde randcondities over een periode van $24u$ (1440 tijdstappen van 60 seconden) vergeleken bij het oplossen van enkel de warmtetransportvergelijking. Daarna worden dan de resultaten vergeleken van het gekoppelde warmte- en vochttransport. De resultaten zijn telkens het oppervlakte gewogen gemiddelde over het materiaal.

Bij de vergelijking van de resultaten van het gekoppeld CFD/HAM-model en *WUFI-2D* waarbij enkel de warmtetransportvergelijking actief is, zijn er quasi geen verschillen tussen het gekoppeld CFD/HAM-model en *WUFI-2D* (FLUENT W en WUFI W) (figuur 3.2).

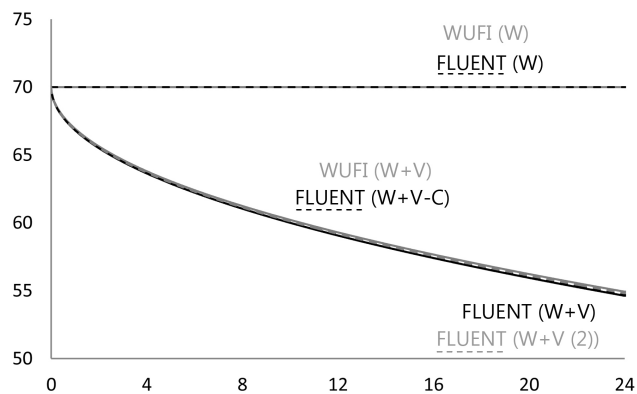
Voor het gekoppeld warmte- en vochttransport daarentegen komen de resultaten van het gekoppeld CFD/HAM-model en *WUFI-2D* enkel overeen als in het gekoppeld CFD/HAM-model de warmtecapaciteit van vloeibaar vocht en damp gelijk wordt gesteld aan nul (WUFI W+V en FLUENT W+V-C) (figuur 3.2).



(a) Temperatuursverloop



(b) Vochtgehalte



(c) Relatieve vochtigheid

Figuur 3.2: Oppervlakte gewogen gemiddelde temperatuur [$^{\circ}\text{C}$], vochtgehalte [kg/m^3] en relatieve vochtigheid [%] voor het gekoppeld CFD/HAM-model en *WUFI-2D* bij het oplossen van de warmte- en massatransportvergelijking in functie van de tijd [uren]. WUFI=*WUFI-2D*-simulatie, FLUENT=gekoppeld CFD/HAM-model simulatie, W=warmtevergelijking, V=vochtvergelijking, -C=zonder warmtecapaciteit van vloeibaar vocht en waterdamp, (2)=met warmtecapaciteit van waterdamp $C_v T G_v$.

Dit verschil is te wijten aan de energie opgeslagen in een poreus materiaal (E):

$$E = \rho_{mat} C_{mat} T + w_l C_l T + w_v (C_v T + L) \quad (3.18)$$

Met C_{mat} , C_l en C_v de warmtecapaciteiten van respectievelijk het materiaal, vloeibaar vocht en damp [$J/(kgK)$] en L de latente warmte.

De bovenstaande vergelijking 3.18 is de vergelijking die wordt gebruikt in het gekoppelde CFD/HAM-model. In *WUFI-2D* wordt bij lage relatieve vochtigheid de termen C_l en C_v gelijk gesteld aan nul (figuur 3.2). Hierdoor komt men tot volgende vergelijking:

$$E = \rho_{mat} C_{mat} T + w_v L \quad (3.19)$$

Deze formule is voor een lage relatieve vochtigheid, dus bij een laag vochtgehalte een goede benadering, aangezien de vochtafhankelijke warmtecapaciteit (C) beschreven wordt door het rekenkundige gemiddelde van:

$$C = C_{mat} + \frac{C_l w_l}{\rho_{mat}} + \frac{C_v w_v}{\rho_{mat}} \quad (3.20)$$

De derde term in het rechter lid van vergelijking (3.20) kan verwaarloosd worden en het tweede lid is veel kleiner dan C_{mat} . Toegepast op deze situatie krijgen we dan:

$$C = 850 + \frac{4192,15,6}{850} = 850 + 27,6 = 877,6 \text{ [J/(kgK)]} \quad (3.21)$$

Bij een hogere relatieve vochtigheid stijgt de invloed van de tweede en derde term van vergelijking 3.20 en is deze niet meer te verwaarlozen.

Anderzijds ziet men ook dat voor een simulatie in het gekoppeld CFD/HAM-model de temperatuur boven de temperatuur van *WUFI-2D* blijft bij een warmte- en vochtflux gelijk aan:

$$q_h = \alpha \Delta T \quad (3.22)$$

$$g_v = \beta_Y \Delta Y \quad (3.23)$$

Dit komt doordat er in het gekoppeld CFD/HAM-model te weinig warmte wordt afgevoerd. Bij de warmteflux moet dus nog een extra term gelijk aan $C_v T G_v$ toegevoegd worden. Deze term houdt dan rekening met de warmtecapaciteit van damp, waardoor er bij uitdroging extra warmte verdwijnt (FLUENT W+V(2)). Na toevoegen van deze term zal de temperatuur dieper zakken dan de bekomen temperatuur uit *WUFI-2D*.

3.6 Besluit

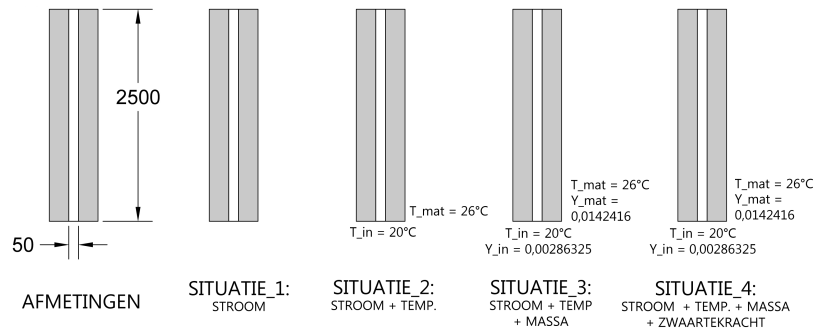
Bij een lage relatieve vochtigheid, dus bij uitsluitend damptransport, geeft *WUFI-2D* een kleine afwijking, waardoor het gekoppeld CFD/HAM-model nauwkeuriger is. Aangezien het gekoppeld CFD/HAM-model geen vloeibaar vochttransport kan simuleren, kan niet vergeleken worden of *WUFI-2D* bij het vloeibaar vochttransport wel rekening houdt met de warmtecapaciteit van vloeibaar vocht en waterdamp. Aangezien de fout zodanig groot zou zijn bij het niet toepassen ervan, wordt verondersteld dat er bij een hoge relatieve vochtigheid er wel rekening mee gehouden wordt.

Hoofdstuk 4

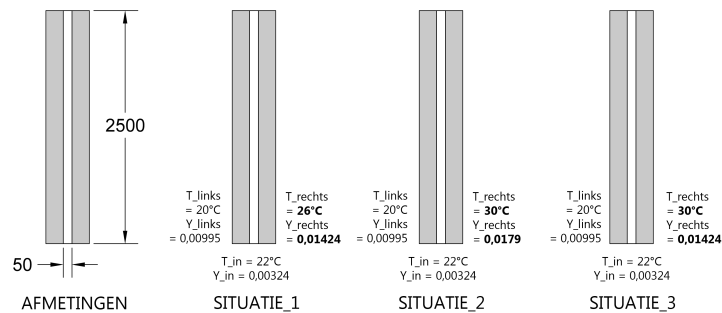
Snelheidsprofiel en warmte- en vochttransport in de luchtspouw

Na een korte kennismaking met beide simulatieprogramma's in het vorige hoofdstuk wordt het gekoppeld CFD/HAM-model in dit hoofdstuk gebruikt om een inzicht te krijgen in de luchtstroming en het warmte- en vochttransport in de luchtspouw. Als testcase om dit te onderzoeken wordt er een spouwmuur met een spouwbreedte van 5 *cm* en een hoogte van 250 *cm* als test case verondersteld. Voor de inlaatsnelheid wordt een gemiddelde snelheid van 0,2 *m/s* opgelegd, aangezien dat een veel voorkomende snelheid is in een spouwmuur van 5 *cm* met een buitenspouwblad uit metselwerk (Straube (2009) en Janssens (1997)). Er wordt zowel een spouwmuur met identieke als verschillende grenscondities voor de temperatuur en de massafractie aan beide spouwoppervlakken onderzocht. Hierbij worden de snelheidsprofielen, overgangscoefficienten en warmte/massa-analogie vergeleken. In het laatste deel wordt tenslotte de invloed van een constante tegenover een opgedeelde overgangscoefficiënt beoogd over de hoogte van de spouw aan de hand van een *WUFI* simulatie over de periode van een volledig jaar.

4.1 Randcondities



(a) *Gelijke* randcondities aan beide spouwbladen.



(b) *Verschillende* randcondities aan beide spouwbladen.

Figuur 4.1: Overzicht van de te onderzoeken situaties bij *gelijke* en *verschillende* randcondities aan beide spouwbladen.

Voor de te onderzoeken cases met *gelijke* randcondities aan beide spouwoppervlakken wordt verwezen naar (figuur 4.1(a)). In situatie 1, 2 en 3 wordt er enkel rekening gehouden met gedwongen convectie en in situatie 4 is er sprake van een combinatie van gedwongen en natuurlijke convectie. Het verschil tussen de eerste drie situaties zit in het feit dat in situatie 1 de warmte- en massatransportvergelijkingen niet worden uitgerekend en in situatie 3 wel. Voor de gemixte convectie wordt enerzijds de invloed van de temperatuur en de vochtigheid op het snelheidsprofiel en de overgangscoefficienten bepaald en anderzijds ook het mogelijke verschil bij het toepassen van een ontwikkeld en een niet ontwikkeld snelheidsprofiel als inlaatconditie.

Voor de te onderzoeken cases met *verschillende* randcondities aan beide spouwbladen wordt verwezen naar (figuur 4.1(b)). De temperatuur en de massafractie van het linker spouwoppervlak blijven constant bij de drie situaties in tegenstelling tot het rechter spouwoppervlak, waarbij de temperatuur en massafractie verschillen bij de drie situaties. Hierbij wordt tevens

gekeken naar de invloed van de temperatuur en de vochtigheid op het snelheidsprofiel en de overgangscoefficienten, als een gevolg van de gemixte convectie. Daarna wordt de invloed van verschillende inlaatsnelheden op de waarde van de overgangscoefficienten en het snelheidsprofiel in de spouw bepaald. Om af te sluiten wordt bepaald of de warmte/massa-analogie al dan niet nog van toepassing is in een spouw met spouwoppervlakken op een verschillende temperatuur en massafractie.

Vaak worden de termen *binnenspouwoppervlak* en *buitenspouwoppervlak* gebruikt. Om misverstanden te vermijden zijn dit de oppervlakken van respectievelijk het binnen- en het buitenspouwblad aan de spouwzijde.

4.2 Opbouw model

Om ervoor te zorgen dat de bekomen resultaten uit het CFD/HAM-model niet afhankelijk zijn van het gebruikte grid wordt er een griddensiteit bepaald die een gridonafhankelijk resultaat voorziet met een bijhorende aanvaardbare foutenmarge. Dit zal gebeuren door gebruik te maken van de *Richardson-extrapolatie*. Naast het grid zijn ook de grootte van de tijdsstap en het aantal iteraties per tijdsstap belangrijk om tot een nauwkeurig resultaat te komen. Deze parameters zijn enkel van toepassing bij transiënte problemen. Aangezien de simulaties in dit hoofdstuk *steady* worden uitgevoerd is dit niet van toepassing.

4.2.1 Convergentie criteria

Om na de simulatie zo dicht mogelijk naar de oplossing te convergeren is het belangrijk de convergentie criteria zo klein mogelijk te nemen. Voor de snelheden wordt zoals in (hoofdstuk 3) een convergentie criterium van 10^{-6} genomen en voor de temperatuur en de massafractie een convergentie criterium van 10^{-9} .

Naast een klein convergentie criterium is een groot aantal iteraties ook belangrijk. Bij een klein aantal iteraties zal de berekening stoppen vooraleer er geconvergeerd is. Het is dus beter een hoger aantal iteraties op te geven, want wanneer de berekening geconvergeerd is, stopt de simulatie sowieso.

4.2.2 Gridonafhankelijkheid via de *Richardson extrapolatie*

Om resultaten te bekomen die gridonafhankelijk zijn, moeten de resultaten bij de verschillende griddensiteiten vergeleken worden. In de case van hoofdstuk 3 werd gebruik gemaakt van een iteratief proces, waarbij er een grid densiteit bepaald werd waarbij het resultaat nauwelijks nog veranderde bij het toepassen van een denser grid.

In deze cases daarentegen wordt de gridonafhankelijkheid bepaald via de *Richardson extrapolatie*. Door gebruik te maken van deze extrapolatie kan ook een relatieve foutenmarge voorspeld worden.

De grid onafhankelijke oplossing wordt dan beschreven door:

$$\Phi = \phi_h + \varepsilon_h^d \quad (4.1)$$

Met ϕ_h de oplossing bij het denste grid en ε_h^d de discretisatie fout gelijk aan:

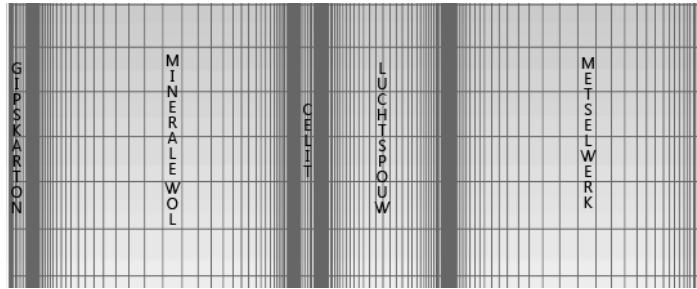
$$\varepsilon_h^d = \frac{\phi_h - \phi_{2h}}{2^a - 1} \quad (4.2)$$

Met ϕ_h en ϕ_{2h} de oplossing bij respectievelijk het denste en het minder dense grid en a de orde gelijk aan:

$$a = \frac{\log(\frac{\phi_{2h} - \phi_{4h}}{\phi_h - \phi_{2h}})}{\log(2)} \quad (4.3)$$

Met ϕ_{4h} de oplossing bij het minst dense grid.

Om de *Richardson extrapolatie* te kunnen toepassen moet men voor de verschillende grids in de verschillende richtingen (x- en y-richting) een evenredige griddensiteit hebben. Hier wordt voor de evenredigheid *twee* genomen. Zo krijgt men een twee keer denser (GRID1=2h) en een vier keer denser grid (GRID2=h) tegenover het oorspronkelijke grid (GRID0=4h). Er wordt met een grid gewerkt waarbij de griddensiteit groter is aan de grenszone tussen materiaal en lucht, omdat daar lokaal de gradiënten als gevolg van de grenslaag groter zijn (figuur 4.2). Hierbij worden de warmteflux, de vochtflux en de snelheid als parameters gebruikt om de gridonafhankelijk te bepalen.



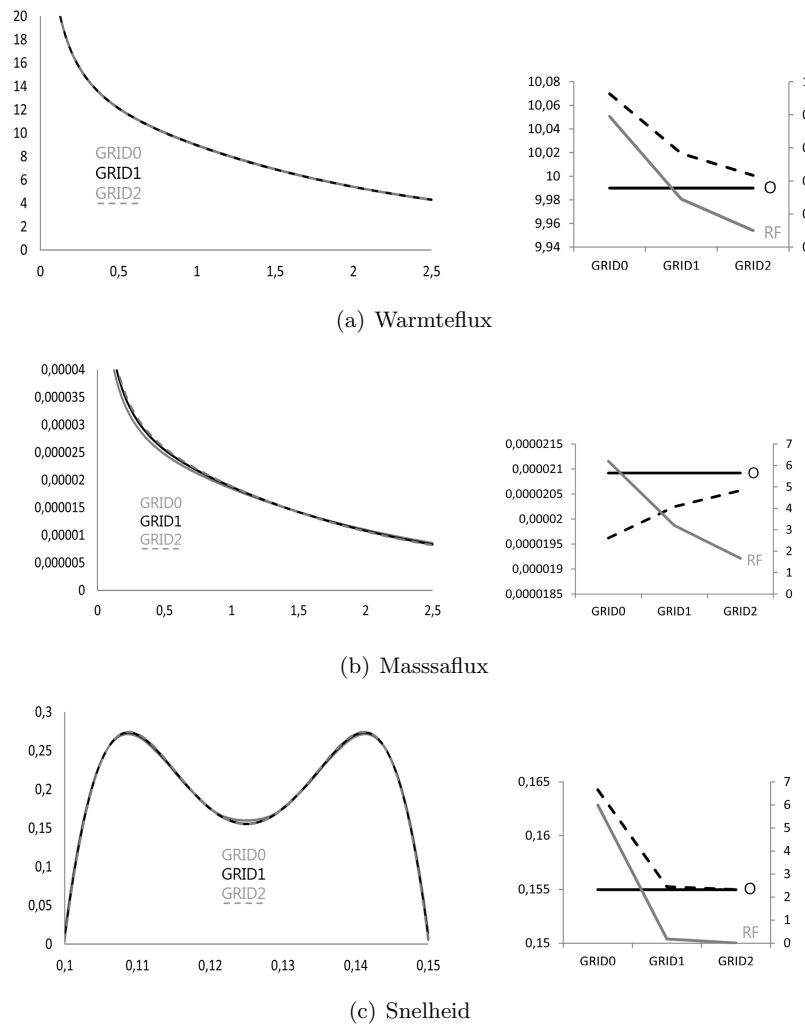
Figuur 4.2: Opbouw van het grid voor het gekoppeld CFD/HAM-model.

Parameters: warmteflux, massaflux en snelheid

Bij het uitzetten van de warmtefluxen [W/m^2] bij *gemixte convectie* over de hoogte van de spouw zijn er nauwelijks verschillen tussen de drie griddensiteiten (figuur 4.3(a)).

In tegenstelling tot de warmtefluxen vertonen de vochtfluxen $[kg/m^2]$ over de hoogte van de spouw wel minieme verschillen tussen de verschillende griddensiteiten (figuur 4.3(b)). Het is vooral onderaan de spouw dat deze verschillen zich voordoen. Dit komt doordat de grenslaag daar nog in volle ontwikkeling is en dus dunner, waardoor de gradiënt lokaal groter is.

Bij het vergelijken van de snelheid $[m/s]$ bij de verschillende griddensiteiten wordt gekeken naar de snelheid op een hoogte van 1 m in de spouw. Net zoals bij de massaflux ziet men een miniem verschil tussen GRID0 en GRID1 (figuur 4.3(c)).



Figuur 4.3: Links: verandering van de warmtefluxen $[W/m^2]$ en massafluxen $[kg/m^2]$ over de hoogte $[m]$ van de spouw bij de drie griddensiteiten en de verandering van de snelheid $[m/s]$ over de breedte van de luchtsponw $[m]$. GRID0 (=4h) is het minst dense grid en GRID2 (=h) het meest dense grid. Rechts: relatieve fout (RF) [%] (rechter verticale as) bij de verschillende griddensiteiten (O=werkelijke oplossing).

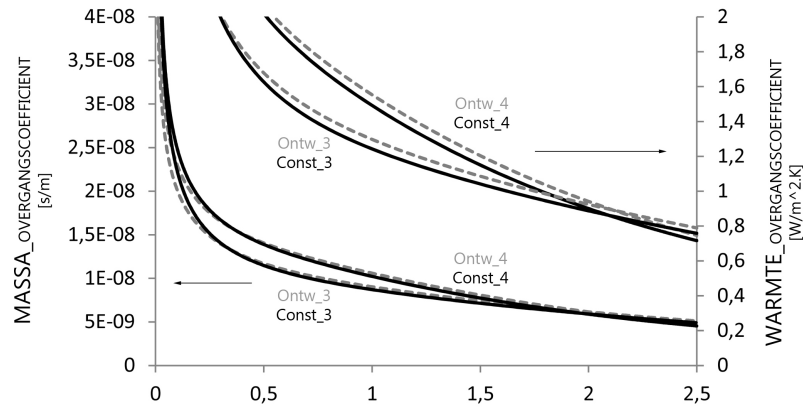
Inzichten

Voor de parameter warmteflux volstaat een grid met een grid densiteit die overeenkomt met GRID0, rekening houdende met de bijhorende relatieve fout van minder dan 1%. Maar om te voldoen aan de drie onderzochte parameters tegelijk wordt er best een grid densiteit gebruikt die overeenkomt met GRID1(=2h). Er wordt dus een strengere eis opgelegd voor de vochtfluxen dan voor de warmtefluxen. Dit fenomeen is te verklaren doordat er voor vochttransport een grotere gradiënt aanwezig is aan de grenslaag.

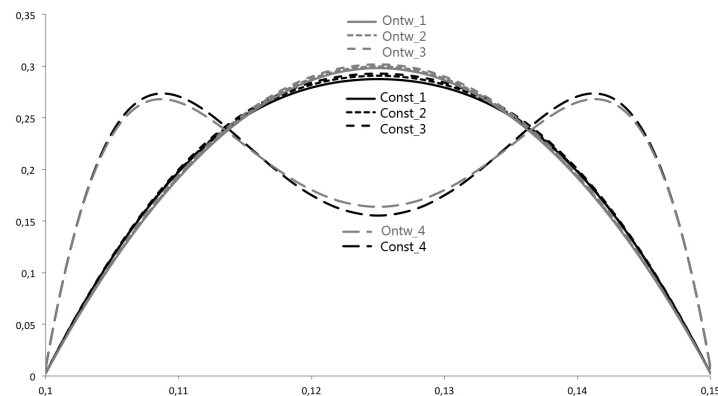
Voor de snelheid is er in principe ook een grotere griddensiteit nodig. Dit komt doordat de snelheid vergeleken wordt centraal in de sponw en daar is de griddensiteit kleiner dan aan de wanden. Dichter bij de sponwoppervlakken is het verschil in snelheid tussen de drie griddensiteiten nihil. Hieruit kan men dus concluderen dat er voor de snelheid en de warmtetransport een minder dens grid nodig is aan de sponwoppervlakken en voor het vochttransport een denser grid.

4.3 Gelijke randcondities aan beide spouwoppervlakken

4.3.1 Overgangscoefficienten, snelheidsprofielen en warmte/massa-analogie



(a) Overgangscoefficienten



(b) Snelheidsprofielen

Figuur 4.4: Ontwikkeling van de overgangscoefficienten over de hoogte $[m]$ van de spouw en snelheid $[m/s]$ in de spouw over de breedte van de luchtspouw $[m]$ op één meter hoogte bij gedwongen (situaties 1 tot 3) en gemixte (situatie 4) convectie bij toepassing van een ontwikkeld (ontw) en een constant (const) snelheidsprofiel aan de inlaat.

Voor de eerste drie onderzochte situaties met constante inlaatsnelheid is het snelheidsprofiel zo goed als identiek (figuur 4.4(b)). Bij de gemixte convectie (situatie 4) stijgt de snelheid lokaal aan de spouw door de lokaal hogere temperatuur en massafractie, waardoor het aandeel natuurlijke convectie stijgt en de overgangscoefficienten ook stijgen (figuur 4.4(a)). Aangezien de eerste drie situaties (enkel gedwongen convectie) zich in de werkelijkheid nauwelijks voordoen, wordt er niet verder op ingegaan.

De warmte- (α) en massa- (β) overgangscoefficienten worden bepaald door:

$$\alpha = \frac{q}{T_s - T_{inlet}} \quad (4.4)$$

en

$$\beta = \frac{g}{p_{v,s} - p_{v,inlet}} \quad (4.5)$$

Met T_s en $p_{v,s}$ respectievelijk de lokale oppervlakte temperatuur en dampdruk en T_{inlet} en $p_{v,inlet}$ respectievelijk de constante inlaat temperatuur en dampdruk.

Hierbij is duidelijk dat de overgangscoefficienten groter zijn aan de onderkant van de spouw en na verloop van tijd een neiging tot convergentie vertonen hoger in de spouw (figuur 4.4(a)). Dit komt doordat de grenslaag onderaan de spouw nog in volle ontwikkeling is en daardoor veel dunner. Hoe hoger in de spouw, hoe meer de grenslaag ontwikkeld is en hoe constanter deze wordt.

Het verschil tussen een constant en een ontwikkeld snelheidsprofiel voor de warmte- en massaovergangscoefficienten bij de verschillende situaties is quasi nihil (figuur 4.4(a)). Er is dus geen noemenswaardig verschil tussen de resultaten bij een constant en een ontwikkeld snelheidsprofiel aan de inlaat. Dit is logisch te verklaren doordat bij het ontwikkeld snelheidsprofiel adiabatise randcondities worden gebruikt. Dus voor die adiabatise randcondities is het profiel ontwikkeld, maar voor specifieke randcondities (temperatuur en massafractie) moet het snelheidsprofiel zich terug herverdelen of met andere woorden, zich herontwikkelen.

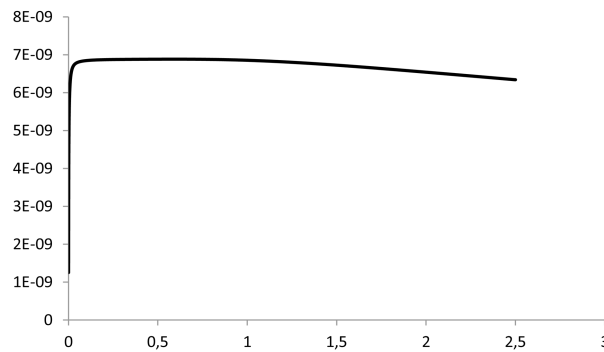
Aangezien de lokale luchtsnelheid aan de spouwoppervlakken de waarde van de overgangscoefficienten bepaalt, is het logisch dat net zoals bij de overgangscoefficienten het verschil in snelheid tussen een constant en een ontwikkeld snelheidsprofiel quasi nihil is (figuur 4.4(b)).

De massaovergangscoefficient ontwikkelt ook sneller dan de warmteovergangscoefficient (figuur 4.4(a)). Dit komt doordat de Lewis-factor niet gelijk is aan één, maar een kleinere waarde heeft (Steeman (2009)). In dit geval is de Lewis-factor gelijk aan 0,808. Dus bij een Lewis-factor kleiner dan één zal de massaovergangscoefficient sneller ontwikkelen dan de warmteovergangscoefficient.

Er is dus duidelijk een directe relatie waar te nemen tussen de lokale luchtsnelheid aan de spouwoppervlakken en de warmte- en massaovergangscoefficienten. Bij gemixte convectie is er een duidelijke verandering van het snelheidsprofiel waarneembaar bij een verhoging van de temperatuur en de massafractie aan de spouwoppervlakken met als gevolg een stijging van de overgangscoefficienten. Dit fenomeen is te verklaren doordat bij gemixte convectie de warme vochtige lucht stijgt en ervoor zorgt dat de luchtsnelheid aan de spouwoppervlakken verhoogt, waardoor lokaal de convectieve warmte- en vochtuitwisseling vergroot, doordat

warme, vochtige lucht een lagere massadichtheid heeft: de molaire massa van water lager is dan van lucht en warme lucht minder dens is.

Voor de warmte/massa-analogie (β/α) bij gemixte convectie is een quasi constante trend waar te nemen van $7,0 \cdot 10^{-6}$ (figuur 4.5). Deze waarde ligt rond de voorspelde waarde van $7,01 \cdot 10^{-6}$ met de *Chilton-Colburn analogie*. Dit resultaat werd ook al voorspeld in (Steeman (2009)).



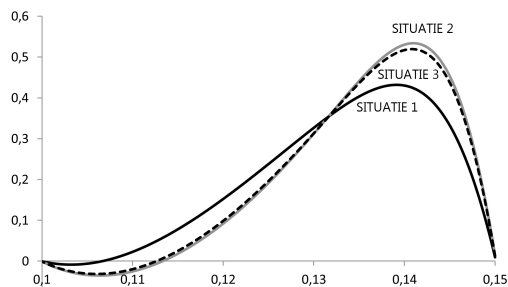
Figuur 4.5: Warmte/massa-analogie bij gemixte convectie bij identieke randcondities aan beide spouwoppervlakken over de hoogte van de spouw [m].

Bij lage Richardson-getallen, dus bij gedwongen en gemixte convectie, is het verschil met de *Chilton-Colburn analogie* miniem. Bij hogere Richardson-getallen, dus bij natuurlijke convectie, is er een grotere afwijking met de *Chilton-Colburn analogie*. Aangezien er hier gewerkt wordt met een Richardson-getal van 0,5, zitten men in een situatie tussen gedwongen en gemixte convectie, waardoor de *Chilton-Colburn analogie* kan toegepast worden in deze situatie. Dus vooraleer men de *Chilton-Colburn analogie* toepast, moet eerst het Richardson-getal berekend worden.

4.4 Verschillende randcondities aan beide spouwoppervlakken

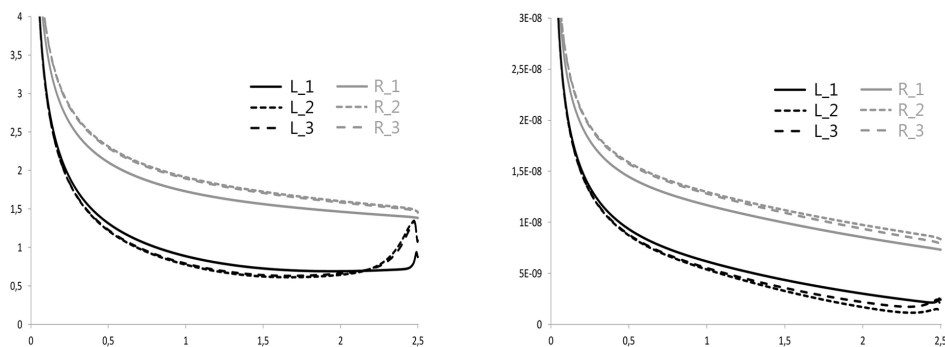
4.4.1 Overgangscoefficienten, snelheidsprofielen en warmte/massa-analogie

Bij het vergelijken van het snelheidsprofiel op 2 m hoogte in de spouw bij de drie situaties (figuur 4.1(b)) is het duidelijk dat bij een verhoogde temperatuur aan het ene spouwoppervlak de snelheid lokaal sterk toeneemt. Dit in tegenstelling tot een verhoging van de massafractie die slechts een beperkte stijging van de snelheid veroorzaakt (figuur 4.6). Dit fenomeen werd ook reeds voorspeld in (Straube (2009)). Zo zijn de winddruk op de muur en de temperatuur van de spouwoppervlakken de grootste drijfkrachten voor het herverdeling van het snelheidsprofiel in de spouw.



Figuur 4.6: Snelheid $[m/s]$ in de spouw over de breedte van de luchtsponw $[m]$ bij een constante inlaatsnelheid van $0,2 m/s$ voor de drie situaties

Voor de overgangscoefficienten komen dezelfde fenomenen voor (figuur 4.7): een verhoogde temperatuur van het spouwblad zorgt voor een verhoging van de overgangscoefficienten in tegenstelling tot een verhoging van de massafractie die slechts voor een beperkte stijging van de overgangscoefficienten zorgt.

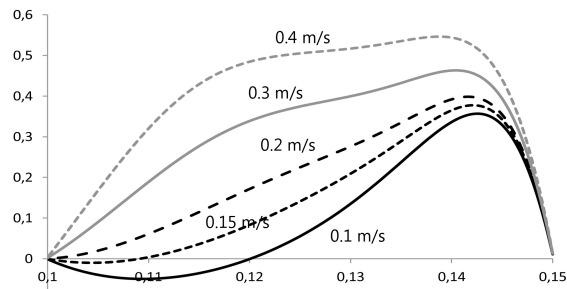


Figuur 4.7: Warmte- $[W/m^2K]$ en massaovergangscoefficienten $[s/m]$ aan het rechter (R) linker (L) spouwoppervlak $[m]$ bij een constante inlaatsnelheid van $0,2 m/s$ voor de drie situaties

De relatie tussen de overgangscoefficienten en het snelheidsprofiel in de spouw is ook hier weer geldig, met andere woorden, hoe hoger de lokale snelheid aan de spouwoppervlakken, hoe groter de overgangscoefficienten.

Verschillende inlaatsnelheden

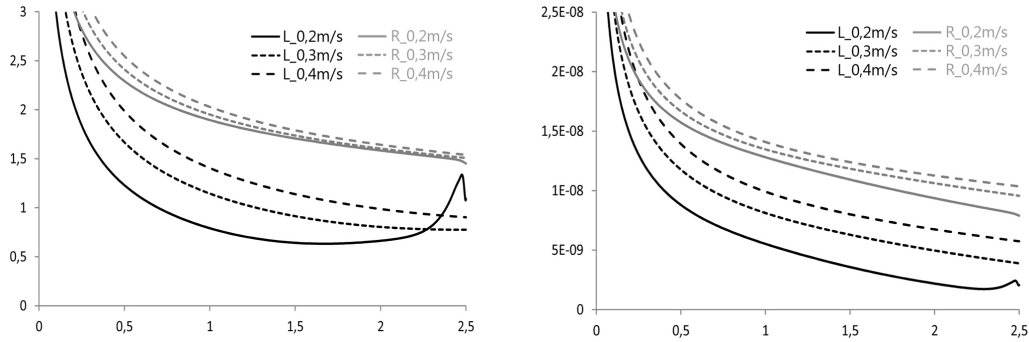
Bij verschillende inlaatsnelheden zal het snelheidsprofiel in de luchtsponw zich herverdelen. In (figuur 4.8) worden de snelheidsprofielen getoond op $1 m$ hoogte voor situatie 3 bij verschillende inlaatsnelheden.



Figuur 4.8: Snelheid [m/s] in de spouw over de breedte van de luchtspouw [m] op 1 m hoogte voor situatie 3 bij verschillende inlaatsnelheden

Indien de inlaatsnelheid relatief klein is, dan overheerst voornamelijk de natuurlijke convectie. Zo krijgt men bij inlaatsnelheden van bijvoorbeeld $0,1 m/s$ een negatief snelheidsprofiel aan het linker spouwblad doordat de warme stijgende lucht aan het relatief koudere spouwoppervlak afkoelt en daalt. De stijgende warme en/of vochtige lucht zal dus als een gevolg van de lagere oppervlakte temperatuur aan het binnenspouwblad weer afkoelen en dalen waardoor er zich een cirkelvormige luchtcirculatie voordoet in de spouw (Hens (1997)). Bij hogere snelheden zal de gedwongen convectie overheersen en ervoor zorgen dat de lokale snelheid steeds positief is. Bij een oneindige spouw of boven een horizontaal oppervlak kunnen er zich dan Bénard cellen ontwikkelen door de temperatuurverschillen tussen de spouwoppervlakken (Saber (2011)). Bij een eindige spouw zoals wij deze kennen is dit niet het geval.

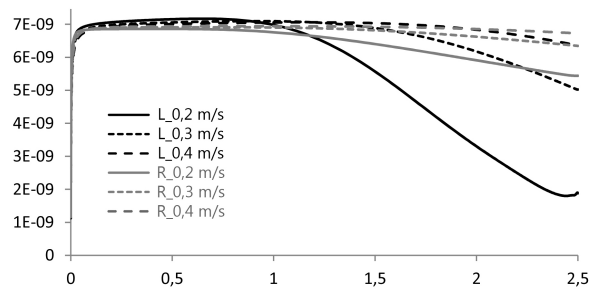
Voor de overgangscoefficienten is er aan de rechter kant, dus bij hogere snelheden als een gevolg van de natuurlijke convectie, een kleiner verschil tussen de overgangscoefficienten dan aan de linker kant, dus bij lagere snelheden (figuur 4.9). Dit komt doordat het snelheidsprofiel aan het rechter spouwoppervlak slechts weinig verandert. Dit in tegenstelling tot het linker spouwoppervlak waar het snelheidsprofiel lokaal sterker varieert.



Figuur 4.9: Warmte- [W/m^2K] en massaovergangscoefficienten [s/m] aan het rechter (R) linker (L) spouwoppervlak over de hoogte van de luchtspouw [m] voor situatie 3 bij verschillende inlaatsnelheden.

Hoger in de spouw wijkt de overgangscoefficiënt lokaal af voor de situaties wanneer er een groter temperatuurverschil is tussen beide spouwoppervlakken en bij lage inlaatsnelheden (figuur 4.9). Dit vertaalt zich in een lokale wervel in de luchtspouw. Als gevolg van het relatief hoge aandeel natuurlijke convectie tegenover het aandeel gedwongen convectie ontstaat er een lage of negatieve snelheid aan het koudere oppervlak. Deze lokaal lage of negatieve snelheid gecombineerd met de opwarming van de spouwlucht met het gebruik van een constante inlaat temperatuur en massafractie om de overgangscoefficienten te berekenen kan dit fenomeen mogelijk verklaren. Deze lokale effecten komen niet voor bij hoge inlaat snelheden en kleine temperatuurverschillen tussen beide spouwoppervlakken.

Voor situatie 3 is de warmte/massa-analogie slechts beperkt toepasbaar (figuur 4.10) en de warmte/massa-analogie klopt beter aan de rechter dan de linker kant. Dit komt doordat daar lokaal hogere snelheden aan het oppervlak gehaald worden als een gevolg van de herverdeling van het snelheidsprofiel. Het verschil bij verschillende inlaatsnelheden kan op dezelfde manier verklaart worden: hoe hoger de inlaatsnelheid, hoe groter het aandeel gedwongen convectie, hoe beter de warmte/massa-analogie benaderd wordt. Het nog in ontwikkeling zijnde snelheidsprofiel lager in de spouw zorgt ervoor dat onder 1 m de analogie toch nog goed benadert wordt, maar hoger niet meer. Een tweede mogelijke reden voor het afwijken van de warmte/massa-analogie hoger in de spouw is dat de spouwlucht hoger in de spouw vochtiger en warmer wordt en de referentie temperatuur en massafractie constant blijven. Deze constante waarden wordt dan gebruikt om de overgangscoefficienten te berekenen.



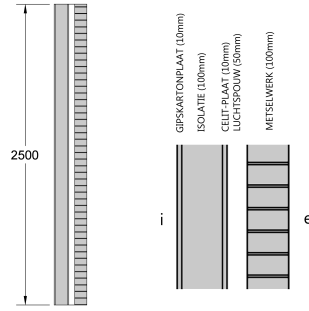
Figuur 4.10: Warmte/massa-analogie aan het rechter (R) linker (L) spouwoppervlak over de hoogte van de luchtspouw $[m]$ voor situatie 3 bij verschillende inlaatsnelheden.

De warmte/massa-analogie geldt dus enkel wanneer het aandeel gedwongen convectie groter is dan het aandeel natuurlijke convectie. Hoger in de spouw kan er zich een afwijking voordoen mogelijk als gevolg van het nog ontwikkelende snelheidsprofiel en doordat de referentie temperatuur of massafractie niet lokaal bepaald wordt, maar constant genomen wordt (inlaat waarde) om de overgangscoefficiënt te bepalen. In deze situaties werden zowel de temperatuur als de massafractie constant genomen, indien, als gevolg van bijvoorbeeld uitdroging de profielen van de oppervlakte temperaturen en massafractie verschillend zijn, dan is deze analogie ook niet van toepassing. Voor meer uitgebreide informatie hierover wordt verwezen naar (Kays & Crawford (1993)). Het is dus belangrijk te beseffen dat het toepassen van een constante warmte/massa-analogie in een luchtspouw niet altijd van toepassing is bij een stroming tussen evenwijdige platen.

4.5 Studie naar de invloed van een constante tegenover een opgedeelde overgangscoefficiënt over de hoogte van de spouw

In werkelijkheid is de overgangscoefficiënt niet constant over de hoogte van de spouw, als een gevolg van de ontwikkeling van de grenslaag. Daarom wordt er onderzocht of er een verschil is tussen het toepassen van een constante tegenover een opgedeelde overgangscoefficiënt over de hoogte van de spouw. Dit wordt onderzocht door het temperatuurverloop en het verloop van het vochtgehalte in de muur te bekijken na één jaar tijd voor beide situaties. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van *WUFI-2D*, aangezien dit programma ontwikkeld is om op een snelle manier langere periodes uit te rekenen. Hierbij wordt de onderlinge invloed van beide spouwen niet in rekening gebracht.

Voor deze case wordt de te onderzoeken muuropbouw gebruikt zoals voorgesteld in de literatuurstudie (figuur 4.11).

**Figuur 4.11:** Opbouw van de spouwmuur

De initiële temperatuur van de materialen bedraagt 20°C en de relatieve vochtigheid 80%. De randcondities buiten worden bepaald door de weerbestand van Brussel in *WUFI-2D*. Voor de randcondities in de spouw wordt tevens de weerbestand van Brussel toegepast aangezien er geventileerd wordt met buitenlucht. Hierbij worden op het spouwoppervlak de *rain reduction factor* en de geabsorbeerde zonnestraling gelijk gesteld aan nul. De temperatuur en relatieve vochtigheid binnen zijn respectievelijk 21°C en 50%.

4.6 Input in *WUFI-2D*

Voor de overgangscoefficienten worden de resultaten gebruikt van situatie 3 bij verschillende randcondities aan beide spouwoppervlakken aan het binnenspouwoppervlak. Voor de constante overgangscoefficient wordt via een rekenblad het oppervlak gewogen gemiddelde berekend van de overgangscoefficient over de volledige hoogte van het spouwoppervlak. Voor de opgedeelde overgangscoefficient wordt de hoogte opgedeeld in vijf zones van $0,5\text{ m}$, waarbij voor elke zone ook via een rekenblad de oppervlak gewogen gemiddelden van de warmte- en massaovergangscoefficienten berekend worden:

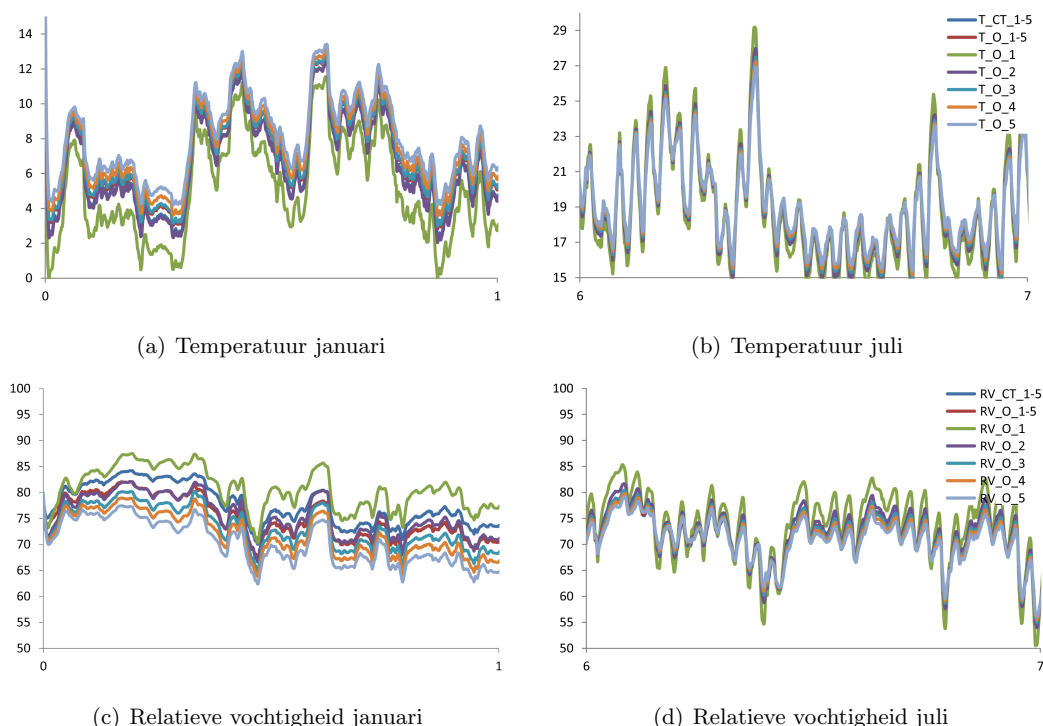
	$\alpha\ [\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}]$	$\beta\ [\text{s}/\text{m}]$
0,0 m tot 0,5 m	2,79	$1,80\cdot 10^{-8}$
0,5 m tot 1,0 m	0,97	$6,90\cdot 10^{-9}$
1,0 m tot 1,5 m	0,73	$4,60\cdot 10^{-9}$
1,5 m tot 2,0 m	0,63	$2,70\cdot 10^{-9}$
2,0 m tot 2,5 m	0,6	$1,86\cdot 10^{-9}$
0,0 m tot 2,5 m	1,15	$6,80\cdot 10^{-9}$

Tabel 4.1: Oppervlak gewogen gemiddelde overgangscoefficienten aan het binnenspouwoppervlak.

Deze gegevens worden dan ingevoerd in *WUFI-2D* als randcondities.

4.6.1 Resultaten

Uit de jaarsimulatie worden de gemiddelde temperatuur en relatieve vochtigheid van de *Celit*-plaat vergeleken voor de constante en de opgedeelde situatie en wordt dan nog eens apart de temperatuur en relatieve vochtigheid vergeleken in de opgedeelde situatie op verschillende hoogtes: 0,25 m (1), 0,75 m (2), 1,25 m (3), 1,75 m (4) en 2,25 m (5)) (figuur 4.12).



Figuur 4.12: Gemiddelde temperatuur [°C] en relatieve vochtigheid [%] op verschillende hoogtes (per halve meter) in de spouw in een zomer- en een wintersituatie. T=temperatuur, RV=relatieve vochtigheid, CT=constante overgangscoefficiënt, O=opgedeelde overgangscoefficiënt

Het is duidelijk dat het verschil tussen de temperatuur en relatieve vochtigheid op verschillende hoogten in de zomer kleiner is dan in de winter (figuur 4.12). Aangezien de binnentemperatuur 21°C bedraagt, wordt deze temperatuur als referentie temperatuur genomen. In de zomer zal men overdag hogere temperaturen en 's nachts lagere temperaturen ten opzichte van deze referentie temperatuur krijgen, waardoor de warmtefluxen van 's nachts deze van overdag compenseren. In de winter daarentegen is de temperatuur quasi constant lager dan de referentie temperatuur van 21°C waardoor de warmtefluxen constant negatief zijn. Deze verliesfluxen worden niet gecompenseerd waardoor het verschil tussen de resultaten op ver-

schillende hoogten groter is. Zo zal in de winter onderaan de spouw de temperatuur veel lager zijn doordat de overgangscoefficiënt daar lokaal hoger is dus er meer warmte wordt afgegeven. In de zomer daarentegen zullen de verliezen van 's nachts redelijk gecompenseerd worden door de fluxen van overdag. Hierdoor is er in de winter lokaal een verschil in relatieve vochtigheid van bijna 15% waar te nemen in de *Celit*-plaat. Zo kan er zich bijvoorbeeld onderaan de luchtspouw schimmelgroei ontwikkelen en bovenaan niet.

4.7 Besluit

Als gevolg van een stroming over een verticale plaat ontwikkelt er zich een grenslaag waarbij de dikte bepaald wordt door de lokale snelheid. Deze lokale snelheid wordt voornamelijk bepaald door enerzijds de inblaassnelheid en anderzijds de lokale oppervlakte temperatuur aan het spouwoppervlak. De dikte van deze grenslaag bepaalt het gemak om convectief warmte en vocht uit te wisselen aan het spouwoppervlak.

Bij twee evenwijdige platen geldt de warmte/massa-analogie enkel wanneer het aandeel gedwongen convectie groter is dan het aandeel natuurlijke convectie. Hoger in de spouw kan er zich een afwijking voordoen mogelijk als gevolg van het nog ontwikkelende snelheidsprofiel en doordat de referentie temperatuur of massafractie niet lokaal bepaald wordt, maar constant genomen wordt (inlaat waarde) om de overgangscoefficienten te bepalen. Het is dus belangrijk te beseffen dat het toepassen van een constante warmte/massa-analogie in een luchtspouw niet altijd van toepassing is.

In de winter is de kans op condensatie groter door de lagere temperaturen waardoor de relatieve vochtigheid stijgt. Doordat men daarbij in de winter quasi enkel warmteverliezen heeft zullen deze onderaan de spouw groter zijn dan bovenaan door de grotere overgangscoefficiënt. In de zomer daarentegen worden de warmte verliezen van 's nachts gecompenseerd door de warmte winsten overdag. Dit heeft tot gevolg dat een opgedeelde overgangscoefficiënt over de hoogte van de spouw een grote impact heeft in de winter, maar slechts een kleine impact in de zomer. Afhankelijk van klimaat tot klimaat zal deze impact dus verschillen.

Hoofdstuk 5

Langegolfstraling in de luchtspouw

In een spouwmuur komen verschillende vormen van warmte- en vochttransport samen. Naast conductie en convectie is er nog de langegolfstraling tussen de spouwbladen. Om het effect van de langegolfstraling in de spouw te begroten worden drie cases onderling vergeleken voor zowel de zomer als de wintersituatie (= 6 cases):

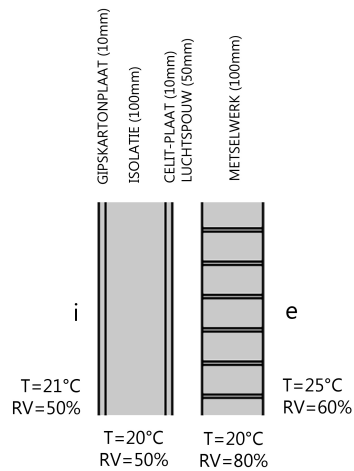
- Case1: spouwmuur waar enkel convectief warmte- en vochttransport plaats vindt.
- Case2: spouwmuur waar naast convectief warmte- en vochttransport ook de zonnestraling in rekening wordt gebracht.
- Case3: spouwmuur waar naast convectief warmte- en vochttransport en de zonnestraling ook langegolfstraling tussen de spouwbladen in rekening wordt gebracht.

Elke case wordt uitgerekend voor een periode van 24 uur (1 dag).

5.1 Zomer

5.1.1 Randcondities

Voor de randcondities voor de zomersituatie wordt verwezen naar (figuur 5.1).

**Figuur 5.1:** Spouwopbouw en randcondities voor de zomersituaties.

	Binnenspouwblad	Luchtspouw	Buitenspouwblad
Temperatuur	20	25	20
Relatieve vochtigheid	50	60	80

Tabel 5.1: Initiële condities voor de zomersituaties.

De inblaascondities en de buitencondities zijn identiek als deze van de luchtspouw.

		α	β
De overgangscoefficienten binnen en buiten zijn:	Binnen	8	$\alpha \cdot 7 \cdot 10^{-9}$
	Buiten	23	$\alpha \cdot 7 \cdot 10^{-9}$

De materiaalkenmerken zijn terug te vinden in (bijlage B).

Aangezien de volgende cases transiënt berekend worden, moeten er extra parameters bepaald worden om de correctheid van het resultaat uit het gekoppeld CFD/HAM-model te waarborgen: de grootte van de tijdsstap en het aantal iteraties per tijdsstap.

Tijdsstap

Indien er transiënt gerekend wordt is de grootte van de tijdsstap belangrijk. Zeker wanneer er luchtstromingen aanwezig zijn aangezien deze zorgen voor een constante verandering van een systeem. Bij grote ventilatievouden gebeuren er bijvoorbeeld meerdere verversingen van de lucht per tijdsstap. Vandaar dat er vaak een kleine tijdsstap gewenst is. Voor transiënte

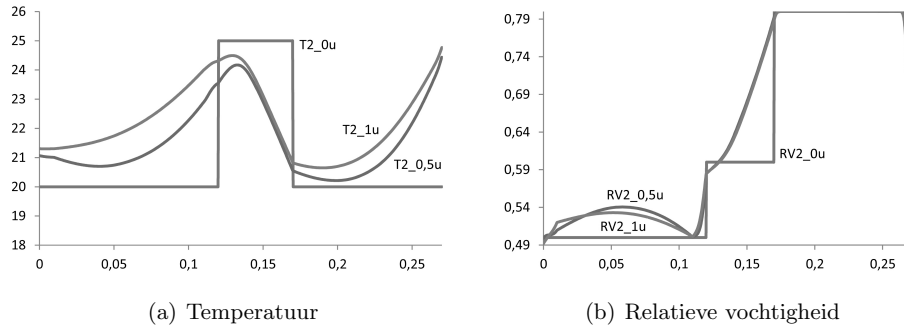
simulaties wordt een tijdsstap van 30 s gebruikt, aangezien er zich bij 60 s niet fysische fenomenen voordoen in de materialen, als een gevolg van numerieke instabiliteiten.

Iteraties per tijdsstap

Aangezien er met een kleine tijdsstap gewerkt wordt, kan de rekentijd beperkt worden door het aantal iteraties per tijdsstap tot een minimum te beperken. Dit kan door het verloop van de convergentie van bepaalde parameters, bijvoorbeeld de temperatuur en de massafractie, te plotten per iteratie. Zo kan men zien hoeveel iteraties er minimum nodig zijn om om beide parameters te laten convergeren. Aangezien de volgende simulaties slechts een beperkte periode (1 dag) simuleren en de correctheid van cruciaal belang is, is het niet zo belangrijk om het aantal iteraties zo klein mogelijk te houden. Bij week- of maandsimulaties daarentegen is dit anders. Er wordt gekozen voor 50 iteraties per tijdsstap.

5.1.2 CASE1

Fenomenen op korte termijn



Figuur 5.2: Temperatuur [°C] en relatieve vochtigheid [%] over de breedte van de spouw [m] op 2 m (2) hoogte voor de zomersituatie tijdens het eerste uur (korte termijn).

Op korte termijn stijgt temperatuur aan het binnenspouwoppervlak ($x=0,12$) relatief sneller dan de temperatuur aan buitenspouwoppervlak ($x=0,17$) (figuur 5.2(a)). Dit komt doordat er naast de *Celit*-plaat een laag thermische isolatie aanwezig is die het warmtetransport van de spouw naar binnen toe afremt, waardoor de ontvangen hoeveelheid warmte uit de luchtpouw wordt opgeslagen in de *Celit*-plaat. Indien de warmtecapaciteit van de *Celit*-plaat lager zou zijn dan de huidige warmtecapaciteit van 1550 J/K, dan zou de temperatuur lokaal nog sneller stijgen. De warmtecapaciteit is een maat voor de thermische traagheid van het systeem.

Doordat de oppervlakte temperatuur van de *Celit*-plaat op dat ogenblik relatief groter is dan de oppervlaktetemperatuur van het metselwerk herverdeelt het snelheidsprofiel zich in de spouw.

Doordat de relatieve vochtigheid in de luchtsponw hoger is dan in het binnensponwblad stijgt de massafractie in de *Celit*-plaat. Hierdoor stijgt de massafractie en dus ook de relatieve vochtigheid in de isolatie (figuur 5.2(b)). Dus zal bij een stijging van de massafractie in de *Celit*-plaat de dampdruk p_v stijgen, waardoor de relatieve vochtigheid stijgt:

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{sat}} \quad (5.1)$$

Op dezelfde manier ontstaat er bij een stijging van de temperatuur een daling van de relatieve vochtigheid, doordat de saturatiedruk p_{sat} stijgt.

Bij de isolatie is er een sterke stijging van de relatieve vochtigheid waar te nemen. Aangezien het verloop van de massafractie in de isolatie lineair is en het verloop van de temperatuur parabolisch ontstaat voor de relatieve vochtigheid een combinatie van het verloop van beide curven. De stijging van de relatieve vochtigheid in de isolatie wijst er tevens op dat de stijging van de massafractie relatief groter is dan de stijging van de temperatuur. Het temperatuursprofiel vervormt dan het verloop van het profiel van de massafractie. Bij een grotere temperatuurval over het binnensponwblad zal het relatief belang van de temperatuur groter zijn dan de massafractie.

Op de grens tussen de isolatie en de *Celit*-plaat vertoont de relatieve vochtigheid een dip (figuur 5.2(b)). In de *Celit*-plaat stijgt de relatieve vochtigheid sterk door de weinig veranderende temperatuur, maar een extreme stijging van het vochtgehalte door de lage diffusie weerstand van het materiaal. In het isolatie materiaal is er dan wel een verandering van de temperatuur waar te nemen, waardoor deze een invloed zal uitoefenen op het verloop van de relatieve vochtigheid binnen deze isolatie. Dieper in het isolatiemateriaal daalt de temperatuur waardoor de relatieve vochtigheid nog wat stijgt. Dichter bij de binnenafwerking zal de relatieve vochtigheid dan weer afzakken door de daling van het vochtgehalte en het stabiliseren van de temperatuur.

Voor de verandering van de relatieve vochtigheid is er een klein verschil zichtbaar tussen de spouwzijde en de buitenzijde van het buitensponwblad. De daling van de relatieve vochtigheid vindt sneller plaats aan het buitenoppervlak. Dit komt door de grotere convectieve overgangscoefficienten aan het buitensponwblad. Zo is de convectieve overgangscoefficient een factor 10 groter aan de buitenzijde dan aan de spouwzijde. Als men anderzijds kijkt naar de diepte van de verandering is er niet veel verschil. Dit komt doordat bij droging het verschil tussen de oppervlaktewaarde en de omgevingswaarde daalt waardoor de fluxen kleiner worden. Vanaf dit moment is het de diffusieve term in het materiaal die bepalend is voor de snelheid van uitdroging. Aangezien de μ -waarde van baksteen redelijk groot is, zal de diffusie traag verlopen.

Op het binnenoppervlak stijgt de temperatuur van 20°C tot ongeveer 21,5°C, wat meer is dan de binnentemperatuur van 21°C. Dit is een gevolg van enerzijds de latente warmte die

vrijkomt door de stijging van het vochtgehalte en anderzijds door de grote warmteflux uit de luchtspouw aangezien daar de temperatuur veel hoger ligt (25°C).

In tegenstelling tot wat men verwacht ziet men op het buitenoppervlak ook een stijging van de temperatuur. Dat is fysisch niet correct aangezien het vochtgehalte daar zakt. De oorzaak daarvan is te vinden in de behoudswetten, meer bepaald het behoud van energie. Net zoals eerder besproken in hoofdstuk 3 wordt in het gekoppeld CFD/HAM-model een warmteflux q gedefinieerd als volgt:

$$q = \alpha(T_i - T_s) \quad (5.2)$$

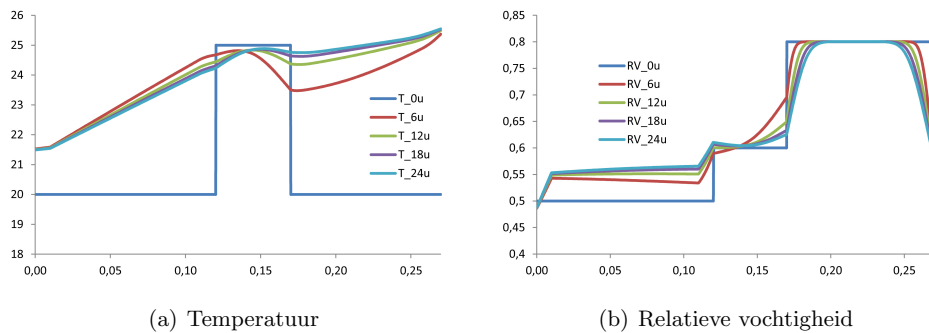
Deze vergelijking is niet volledig aangezien er geen rekening wordt gehouden met de term $C_v \cdot T \cdot g_v$. Om hieraan te voldoen moet de vergelijking van de warmteflux worden omgevormd tot:

$$q = \alpha(T_i - T_s) + C_v T G_v \quad (5.3)$$

Aangezien dit fenomeen pas werd opgemerkt na de verwerking van de simulaties wordt er in deze cases nog verder gerekend met $q = \alpha(T_i - T_s)$. Enerzijds heeft dit voor de onderlinge vergelijking van de drie cases weinig invloed, omdat de afwijking zich op het buiten- en binnenoppervlak bevindt en anderzijds blijft de absolute invloed ook eerder beperkt. Voor de wintersituaties wordt er dan overgeschakeld op de warmteflux (q) gelijk aan $\alpha(T_i - T_s) + C_v T G_v$.

Na een snelle vergelijkende test van de temperatuur na zes uur met $q = \alpha(T_i - T_s)$ bekomt men aan het buitenoppervlak een temperatuur van 25,4°C en met $q = \alpha(T_i - T_s) + C_v T G_v$ een temperatuur van 24,6°C, wat fysische correcter is. Aan het binnenoppervlak is de verandering kleiner (0,1°C) omdat deze hoofdzakelijk wordt bepaald door de warmteflux vanuit de luchtspouw.

Fenomenen op lange termijn: streven naar een evenwicht



Figuur 5.3: Temperatuur [°C] en relatieve vochtigheid [%] over de breedte van de spouw [m] op 2 m hoogte voor de zomersituatie (CASE1) voor 1 dag om de 6 u.

Er is duidelijk een grote temperatuursval ter hoogte van het isolatiemateriaal (figuur 5.3(a)). Dit is een logisch gevolg van de grote warmtegeleidingsweerstand (λ -waarde) van de isolatie. Voor de relatieve vochtigheid ziet men net het tegenovergestelde fenomeen. De grootste massaval vindt plaats ter hoogte van de gipskartonplaat en de *Celit*-plaat (figuur 5.3(b)). Dit is een logisch gevolg van de relatief grotere diffusieweerstand (μ -waarde).

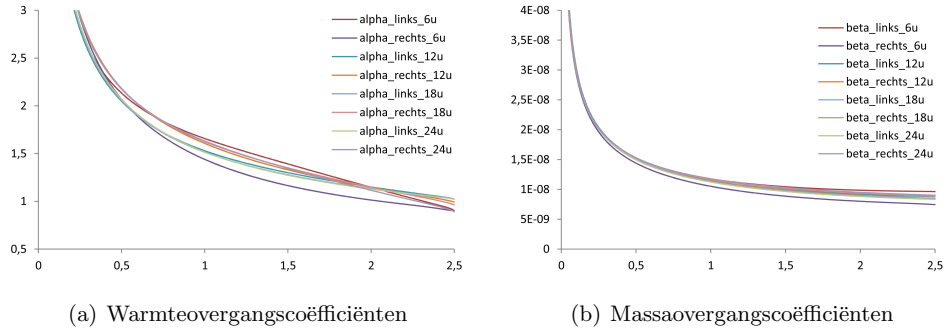
Bij vergelijking van de hellingen van het verloop van relatieve vochtigheid in de luchtsponw en het isolatie materiaal ziet met dat die quasi gelijk zijn. Dit komt doordat de diffusieweerstandsgetal van isolatie gelijk is aan 1,3 en van lucht gelijk aan 1. Dit wordt verklaard doordat isolatie gezien kan worden als stilstaande lucht aangezien het geen vocht kan opslaan en een porositeit van 95% heeft. Het vochtgehalte (w) kan dan bepaald worden door:

$$w = \phi \frac{p_{sat} \varphi}{\mathcal{R}_v T} \quad (5.4)$$

Met ϕ de porositeit en T de temperatuur $[K]$.

Na verloop van tijd komen de curven van zowel de temperatuur als de relatieve vochtigheid naar een evenwichtssituatie. In het binnensponwblad is dit evenwicht zo goed als bereikt. In het buitensponwblad daarentegen nog niet. Daar is er duidelijk sprake van een ontwikkeling van een vochtfront bij de droging van het metselwerk. Dit is een typisch fenomeen dat zich voordoet bij metselwerk.

Overgangscoefficienten



Figuur 5.4: Warmte- $[W/m^2K]$ en massa- $[s/m]$ overgangscoefficienten over de hoogte van de spouw $[m]$ op het linker en rechter spouwoppervlak voor de zomersituatie (CASE1) voor 1 dag om de 6 u .

De algemene trend van de overgangscoefficienten is na 6 u zo goed als gelijk (figuur 5.4). Dit komt enerzijds doordat er geen snelle veranderingen van de randcondities (temperatuur en massafractie) op korte tijd voorkomen en anderzijds doordat de temperaturen aan beide spouwoppervlakken na 6 u quasi gelijk zijn. De temperatuur en de relatieve vochtigheid

aan de spouwoppervlakken zijn dan gelijk aan de inblaascondities. Initieel is er als gevolg van een temperatuurverschil tussen beide spouwoppervlakken wel een verschil tussen de overgangscoefficienten.

5.1.3 CASE2

Randcondities

De randcondities van de relatieve vochtigheid en temperatuur van CASE2 zijn identiek aan die van CASE1. In CASE2 wordt er nog een extra warmtebron toegevoegd op het buitenspouwblad die het aandeel van de zonnestraling vertegenwoordigd. Deze flux is gelijk aan:

$$q = a \cdot \text{invallende straling} \quad (5.5)$$

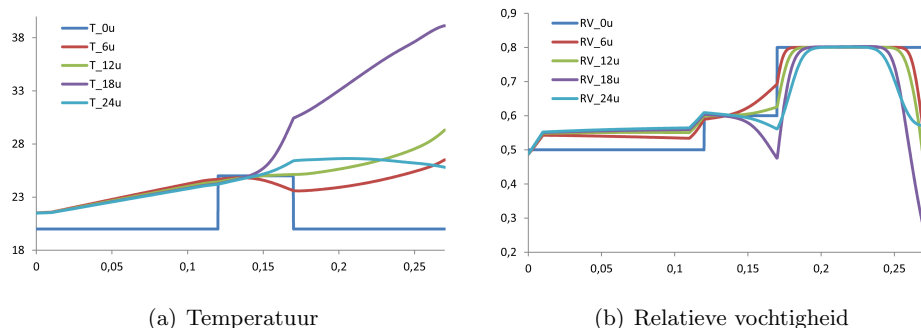
Met a de absorptie factor. Voor baksteen is deze gelijk aan 0,68. De invallende straling die wordt gebruikt komt overeen met de maximale zonnestraling bij helder weer op een verticale westgevel voor de maand juni [W/m^2] (figuur 5.5):

Verticaal vlak (s=90°), west(a _s =90°)											
uur ↓	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
4.0	0	0	0	0	0	11	4	0	0	0	0
5.0	0	0	0	2	26	32	28	13	0	0	0
6.0	0	0	0	29	41	44	42	35	20	0	0
7.0	0	0	27	43	50	52	50	46	38	24	0
8.0	6	25	40	51	56	58	57	53	47	38	23
9.0	26	38	49	57	62	63	62	59	54	47	36
10.0	37	47	56	65	69	70	69	67	63	56	45
11.0	47	56	67	76	81	82	80	77	74	67	55
12.0	75	77	106	148	162	145	130	134	157	169	141
13.0	100	244	297	349	362	336	323	334	347	335	265
14.0	266	370	455	514	529	512	500	502	499	445	312
15.0	222	397	539	615	631	621	613	610	579	440	231
16.0	0	274	485	623	661	661	657	641	535	274	0
17.0	0	0	262	476	583	616	614	550	321	0	0
18.0	0	0	0	198	368	453	447	315	0	0	0
19.0	0	0	0	0	109	211	200	57	0	0	0

Figuur 5.5: Maximale zonnestraling bij helder weer (diffuus en direct, [W/m^2]) op een verticale westgevel (juni) (Hens (1997)).

Aangezien in de zomersituatie onderkoeling naar de hemelkoepel nauwelijks voorkomt als een gevolg van de hogere temperatuur van de hemelkoepel, wordt onderkoeling in deze case niet in rekening gebracht.

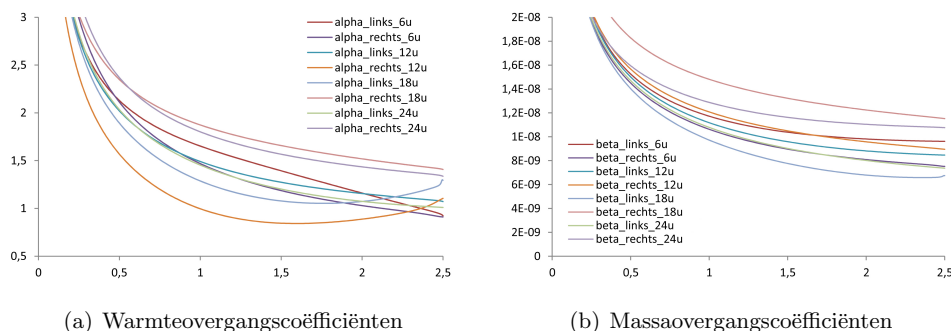
Fenomenen



Figuur 5.6: Temperatuur [°C] en relatieve vochtigheid [%] over de breedte van de spouw [m] op 2 m hoogte voor de zomersituatie (CASE2) voor 1 dag om de 6u.

De toevoeging van een warmteflux die overeenkomt met de ontvangen zonnestraling op een zonnige juni dag doet de temperatuur in het metselwerk sterk stijgen. Lokaal krijgt men dan oppervlaktetemperaturen buiten tot 40°C (figuur 5.6). Hierdoor stijgt de temperatuur van het buitenspouwoppervlak tot 30°C, waardoor het snelheidsprofiel zich herverdeelt over de breedte van de luchtspouw. Als gevolg stijgt de grootte van de convectieve warmte- en massafluxen aan het buitenspouwoppervlak, waardoor de warmte sneller wordt afgevoerd.

Overgangscoefficienten



Figuur 5.7: Warmte- [W/m^2K] en massa- [s/m] overgangscoefficienten over de hoogte van de spouw [m] op het linker en rechter spouwoppervlak voor de zomersituatie (CASE2) voor 1 dag om de 6 u.

In deze case is er een grotere variatie van de overgangscoefficienten over de tijd waar te nemen (figuur 5.7). Dit komt als gevolg van de bijkomende warmteflux aan het buitenspouwblad waardoor de temperatuur van het buitenspouwoppervlak stijgt en het snelheidsprofiel zich herverdeelt.

Anderzijds stijgt na 12 uur de warmteovergangscoefficiënt hoger in de spouw. Dit komt doordat net voor de 12 uur de warmteflux onderaan de spouw van richting verandert en bovenaan nog niet. De temperatuur onderaan de spouw bereikt sneller 25°C (inlaattemperatuur) dan bovenaan door de dunnere grenslaag onderaan en dus de grotere warmteflux. Door die dunnere grenslaag stijgt de oppervlaktetemperatuur ook sneller boven de 25°C . Na 12 uur zijn alle oppervlaktetemperaturen boven hoger dan 25°C waardoor de warmteflux overal in dezelfde richting loopt, maar de temperatuur bovenaan is wel nog lager dan onderaan. Vandaar de stijging van de warmteovergangscoefficiënt hoger in de spouw. Indien men als referentie temperatuur niet de inlaattemperatuur neemt, maar de lokale temperatuur op de hoogte waar men de warmteovergangscoefficiënt wil berekenen, zou dit fenomeen zich minder of niet voordoen. Fysisch gezien is het dus niet correct de overgangscoefficiënten te berekenen met een constante inlaattemperatuur als referentietemperatuur, maar technisch gezien is de afwijking aanvaardbaar doordat de fluxen zodanig klein zijn. Deze afwijkende overgangscoefficiënten kunnen dus genegeerd worden. Voor de massaovergangscoefficiënten komen dezelfde fenomenen voor.

Inzichten

De invloed van de warmtefluxen afkomstig van een uitwendige energiebron zoals de zon is sterk bepalend voor de temperatuur in het buitenspouwblad. Deze fluxen zijn relatief groter dan de convectieve term, ookal is de warmteovergangscoefficiënt buiten drie keer groter dan binnen. Zo zou men kunnen aannemen dat de temperatuur en vochtigheid in het buitenspouwblad sterk bepaald worden door de warmte- en vochtfluxen van buitenaf, zoals bijvoorbeeld zonnestraling en regen.

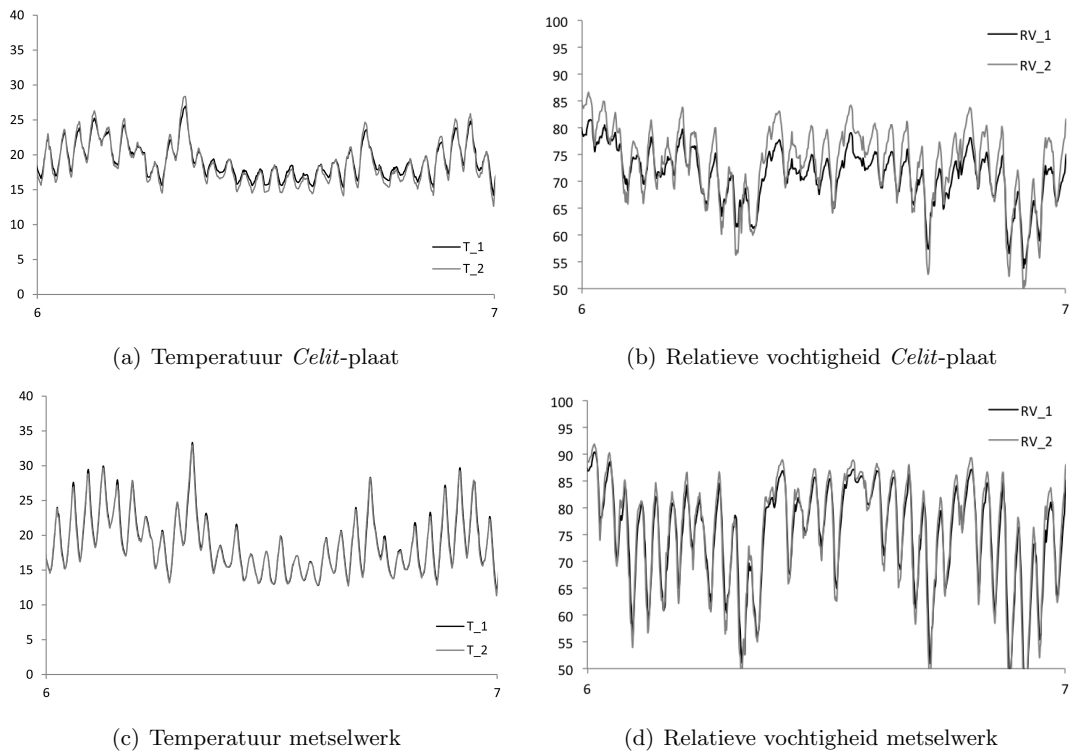
Invloed van de overgangscoefficiënten in de spouw

Om de invloed van de overgangscoefficiënten in de spouw tegenover de externe warmte- en vochtbronnen te testen wordt een jaar simulatie in *WUFI-2D* opgezet. De simulatie bestaat uit een identieke spouwmuur met identieke randcondities binnen (21°C en $\varphi=50\%$) en een weerbestand van Brussel voor de randcondities buiten (2010). De warmteovergangscoefficiënten buiten en binnen zijn respectievelijk gelijk aan $23 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ en $8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. De massaovergangscoefficiënten zijn gelijk aan de warmteovergangscoefficiënten vermenigvuldigd met $7,0\cdot 10^{-9}$. Voor de oppervlakken grenzend aan de luchtspouw wordt dezelfde weerbestand gebruikt maar met een absorptie factor en een *rain reduction factor* gelijk aan nul. De absorptie factor buiten is gelijk aan deze van baksteen en de *rain reduction factor* is gelijk aan 0,7, wat overeenkomt met de *rain reduction factor* van een verticaal vlak. Indien men zou werken met een plat dak dan moet de *rain reduction factor* gelijk gesteld worden aan 1. De *rain reduction*

factor bepaald in principe hoeveel vocht het materiaal zou kunnen opnemen. Vanaf er water weg loopt of spat van een materiaal is de *rain reduction factor* kleiner dan 1.

Er worden twee situaties uitgerekend, één waarbij de warmteovergangscoefficiënt in de spouw gelijk is aan $1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ en één gelijk aan $2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. De massaovergangscoefficiënten zijn gelijk aan de warmteovergangscoefficiënten vermenigvuldigd met $7,0 \cdot 10^{-9}$. Hieruit worden dan na een simulatie van één jaar de oppervlakte gewogen gemiddelde temperatuur en relatieve vochtigheid geplot van de *Celit*-plaat en het metselwerk.

De invloed van de spouwbladen onderling wordt hierbij niet in rekening gebracht, maar enkel de invloed van de randcondities.



Figuur 5.8: Gemiddelde temperatuur [°C] en relatieve vochtigheid [%] in de *Celit*-plaat en het metselwerk in de maand juli voor α gelijk aan $1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (1) en $2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (2).

Een verdubbeling van de overgangscoefficiënten heeft een grotere impact op het binnenspouwblad dan op het buitenspouwblad (figuur 5.8). Dit is logisch te verklaren doordat er op het buitenspouwblad grotere warmte- en vochtfluxen inwerken dan op het binnenspouwblad. Met als gevolg dat de temperatuur en vochtigheid van het buitenspouwblad sterk bepaald worden door de buitencondities (regen en zon) en minder door de geventilerende spouw lucht.

Voor het binnenspouwblad daarentegen wordt de temperatuur en vochtigheid vooral bepaald

door de spouwvlucht en minder door de binnencondities. Dit komt enerzijds doordat de randcondities (warmte- en vochtfluxen) binnen kleiner zijn en anderzijds door de thermische isolatie in het binnenspouwblad die de warmtefluxen van binnen naar buiten afremt.

5.1.4 CASE3

Randcondities

De randcondities van CASE3 zijn identiek aan deze van CASE2. Als bijhorende vorm van warmtetransport wordt de lange golfstraling in de spouw als gevolg van de temperatuurverschillen ook in rekening gebracht. Om de rekentijd te beperken in het gekoppeld CFD/HAM-model wordt de oppervlak gewogen temperatuur genomen en niet de lokale temperatuur. Dit heeft als gevolg dat er een vereenvoudiging wordt geïmpliceerd, maar aangezien deze case enkel de relatieve invloed van de lange golfstraling in de spouw wil begroten, is deze vereenvoudiging aanvaardbaar. In het gekoppeld CFD/HAM-model wordt voor de simulatie van de lange golfstraling gebruik gemaakt van een *surface-to-surface*-stralingsmodel. De stralingswarmteflux (J) dat het oppervlak (k) verlaat bestaat uit twee delen: de uitgezonden straling en de gereflecteerde straling en kan berekend worden als volgt:

$$J_k = \varepsilon \sigma T_k^4 + \rho_{f,k} \sum F_{kj} J_j \quad (5.6)$$

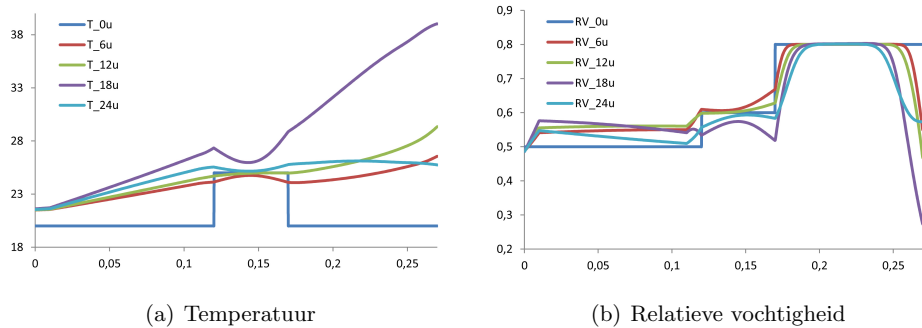
Met ε de emissiefactor, σ de Stefan-Boltzmann constante en ρ_f de reflectiefactor en F_{kj} de *viewfactor* tussen oppervlak k en j . De *viewfactoren* hangen af van de geometrie van beide oppervlakken. Hier zijn deze gelijk aan 1, aangezien verondersteld wordt dat beide oppervlakken elkaar volledig zien.

Als gevolg van het grote aantal cellen dat numeriek uitgerekend moet worden op het oppervlak en dus de extreem grote rekenkracht worden cellen geclusterd. Voor deze cluster wordt dan de oppervlak gewogen temperatuur bereken volgens:

$$T_{s,avg} = \frac{\sum_s A_s T_s^4}{\sum_s A_s}^{1/4} \quad (5.7)$$

Voor meer informatie rond het stralingsmodel en *viewfactoren* wordt verwezen naar (Siegel & Howell (1998)).

Fenomenen

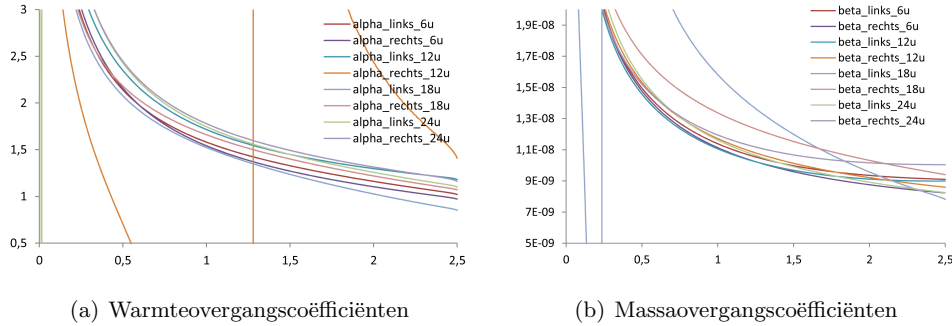


Figuur 5.9: Temperatuur [°C] en relatieve vochtigheid [%] over de breedte van de spouw [m] op 2 m hoogte voor de zomersituatie (CASE3) voor 1 dag om de 6u.

De impact van de langegolfstraling speelt dus duidelijk een rol voor de warmteoverdracht in de luchtspouw (figuur 5.9). De temperatuur aan het binnenspouwoppervlak stijgt initieel minder snel in vergelijking met CASE2 en de temperatuur aan het buitenspouwoppervlak stijgt sneller. Dit komt doordat er een extra warmteflux is van het binnenspouwoppervlak naar het buitenspouwoppervlak door de relatief hogere temperatuur.

Aangezien temperatuurveranderingen een directe invloed hebben op de relatieve vochtigheid en dus op het risico op schimmelgroei is het belangrijk deze langegolfstraling in rekening te brengen. Na 18 u, dus bij extreme warmtefluxen van de zon stijgt de temperatuur aan het buitenspouwoppervlak minder dan zonder rekening te houden met de langegolfstraling. De extra warmte wordt via de langegolfstraling overgebracht naar het binnenspouwblad en daardoor is er een stijging van de temperatuur aan het binnenspouwoppervlak en een daling van de temperatuur aan het buitenspouwoppervlak waar te nemen.

Overgangscoefficienten



Figuur 5.10: Warmte- $[W/m^2 K]$ en massa- $[s/m]$ overgangscoefficienten over de hoogte van de spouw $[m]$ op het linker en rechter spouwoppervlak voor de zomersituatie (CASE3) voor 1 dag om de 6 u.

Voor de overgangscoefficienten is het verschil tussen de rechter spouwoppervlak en het linkerspouwoppervlak beperkt (straling 5.10).

Als gevolg van de quasi gelijke temperaturen op het linker als op het rechter spouwoppervlak herverdeelt het snelheidsprofiel zich symmetrisch. Dit komt doordat de temperatuur de grootste invloed uitoefent op de lokale snelheid. Door deze symmetrie is de lokale snelheid aan de spouwoppervlakken quasi gelijk, waardoor de overgangscoefficienten ook quasi gelijk zijn.

Af en toe is er zoals eerder opgemerkt een afwijking van de overgangscoefficienten waar te nemen bij bepaalde tijdstappen. Dit komt doordat er op die bepaalde tijdstippen een quasi evenwicht ontstaat tussen de lucht en het materiaal waardoor de fluxen zeer klein zijn. Indien men dan de inlaattemperatuur of -massafractie als referentie waarde gebruikt voor het berekenen van de overgangscoefficient, dan kunnen deze afwijkingen ontstaan.

Inzichten

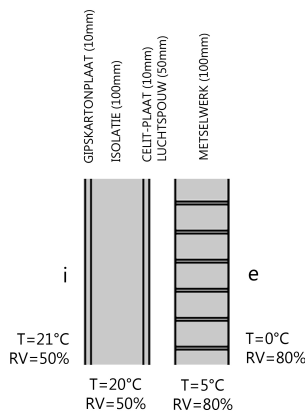
Bij inlaatsnelheden van $0,2 \text{ m/s}$ is de impact van langegolfstraling in de spouw niet te onderschatten. In (Steeman (2009)) wordt reeds opgemerkt dat voor kleine luchtsnelheden de invloed van langegolfstraling wel invloed heeft op de droging van het materiaal. Dit komt doordat bij lage snelheden het relatief aandeel van convectief transport verkleint.

De hoeveelheid warmte uitwisseling als gevolg van de langegolfstraling is hoofdzakelijk afhankelijk van enerzijds de reflectiefactoren van beiden oppervlakken (Saber (2011)) en anderzijds het temperatuurverschil tussen beide oppervlakken. Deze temperatuurverschillen kunnen ontstaan als een gevolg van een slecht isolatie van het binnenspouwblad of extreme warmtefluxen op het buitenspouwblad.

5.2 Winter

5.2.1 Randcondities

Voor de randcondities voor de wintersituatie wordt verwezen naar (figuur 5.11).



Figuur 5.11: Spouwopbouw en randcondities voor de wintersituaties.

	Binnenspouwblad	Luchtspouw	Buitenspouwblad
Temperatuur	20	0	5
Relatieve vochtigheid	50	80	80

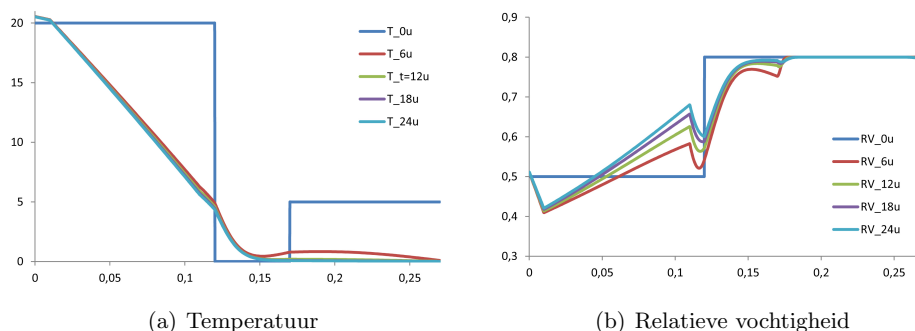
Tabel 5.2: Initiële condities voor de wintersituaties.

De inblaascondities en de buitencondities zijn identiek als deze van de spouwlucht. De temperatuur en relatieve vochtigheid binnen is respectievelijk gelijk aan 21°C en 50%.

De overgangscoefficienten binnen en buiten zijn:		α	β
	Binnen	8	$\alpha \cdot 7 \cdot 10^{-9}$
	Buiten	23	$\alpha \cdot 7 \cdot 10^{-9}$

5.2.2 CASE1

Fenomenen



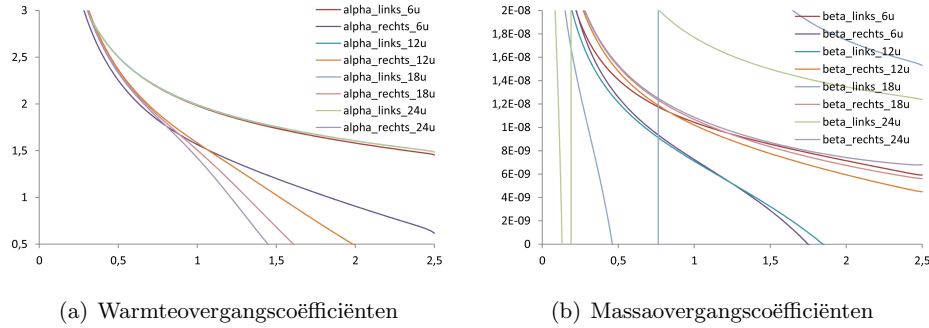
Figuur 5.12: Temperatuur [°C] en relatieve vochtigheid [%] over de breedte van de spouw [m] op 2 m hoogte voor de wintersituatie (CASE1) voor 1 dag om de 6 u.

In de *Celit*-plaat stijgt de relatieve vochtigheid als een gevolg van de sterke daling van de temperatuur (figuur 5.12). In het isolatiemateriaal daalt tevens de massafractie waardoor er een daling van de relatieve vochtigheid verwacht wordt, maar door de extreme daling van de temperatuur stijgt de relatieve vochtigheid lokaal in de isolatie. Door de stijging van de temperatuur met 1°C ter hoogte van de binnenaafwerking, de daling van de massafractie, de grote diffusie weerstand en de lage warmteweerstand van de gipskartonplaat daalt lokaal de relatieve vochtigheid in het isolatiemateriaal.

In principe zou men net zoals in de zomer een constante stijging van de relatieve vochtigheid verwachten, maar door de grote temperatuursval in de isolatie als gevolg van het grote temperatuursverschil tussen het binnenoppervlak en het spouwoppervlak wordt de invloed van de temperatuur sterker, waardoor de relatieve vochtigheid lokaal stijgt.

Ter hoogte van het binnenspouwoppervlak zakt de temperatuur nauwelijks onder de 5°C. Nochtans wordt er in een systeem telkens naar een evenwicht gestreefd. Hierdoor zou men verwachten dat de temperatuur aan het binnenspouwoppervlak ook ongeveer nul graden wordt. Bij een lagere λ -waarde of grotere dikte van het isolatie materiaal zou de temperatuur lokaal wel de evenwichtstemperatuur bereiken doordat er een grotere temperatuursval mogelijk is over het isolatiemateriaal.

Overgangscoefficienten



Figuur 5.13: Warmte- [W/m^2K] en massa- [s/m] overgangscoefficienten over de hoogte van de spouw [m] op het linker en rechter spouwoppervlak voor de wintersituatie (CASE1) voor 1 dag om de 6 u .

Voor de warmteovergangscoefficienten is duidelijk een verschillende trend waar te nemen aan beide spouwbladen door de verschillende oppervlakte temperatuur (figuur 5.13). Aan de rechterkant is er wel af en toe een afwijking. Dit komt doordat de fluxen daar lokaal zo klein zijn. Dus door een kleine stijging van de temperatuur van de spouwlucht door het binnenspouwblad wisselt de warmteflux van teken op hogere hoogten in de spouw. Dit in combinatie met een constante referentie temperatuur zorgt ervoor dat de warmteovergangscoefficienten negatief worden of een asymptoot vertonen. Hetzelfde fenomeen is waar te nemen voor de massafluxen. Vanaf er een evenwicht bereikt is voor de massafractie Y , dan ontstaan er telkens afwijkingen voor de overgangscoefficienten.

Inzichten

Als een gevolg van de grote temperatuursval over het isolatie materiaal gaat het verloop van de relatieve vochtigheid er anders gaan uitzien dan in de zomersituatie. Dit doordat de relatieve vochtigheid een combinatie is van de temperatuur en het vochtgehalte en bij een grote temperatuursval overheerst de invloed van de temperatuur ten opzichte van het vochtgehalte.

5.2.3 CASE2

Randcondities

De randcondities van de relatieve vochtigheid en temperatuur van CASE2 zijn identiek aan die van CASE1. In CASE2 wordt er nog een extra warmtebron aangelegd op het buitenspouwblad die het aandeel van de zonnestraling vertegenwoordigt. Deze flux is gelijk aan:

$$q = a.invallende \text{ straling} \quad (5.8)$$

Met a de absorptie factor. Voor baksteen is die gelijk aan 0,68. De invallende straling die wordt gebruikt komt overeen met de maximale zonnestraling bij helder weer op een verticale westgevel voor de maand december [W/m^2] (figuur 8.2):

uur ↓	Verticaal vlak ($s=90^\circ$), west ($a_s=90^\circ$)										
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
4.0	0	0	0	0	0	11	4	0	0	0	0
5.0	0	0	0	2	26	32	28	13	0	0	0
6.0	0	0	0	29	41	44	42	35	20	0	0
7.0	0	0	27	43	50	52	50	46	38	24	0
8.0	6	25	40	51	56	58	57	53	47	38	23
9.0	26	38	49	57	62	63	62	59	54	47	36
10.0	37	47	56	65	69	70	69	67	63	56	45
11.0	47	56	67	76	81	82	80	77	74	67	55
12.0	75	77	106	148	162	145	130	134	157	169	141
13.0	100	244	297	349	362	336	323	334	347	335	265
14.0	266	370	455	514	529	512	500	502	499	445	312
15.0	222	397	539	615	631	621	613	610	579	440	231
16.0	0	274	485	623	661	661	657	641	535	274	0
17.0	0	0	262	476	583	616	614	550	321	0	0
18.0	0	0	0	198	368	453	447	315	0	0	0
19.0	0	0	0	0	109	211	200	57	0	0	0

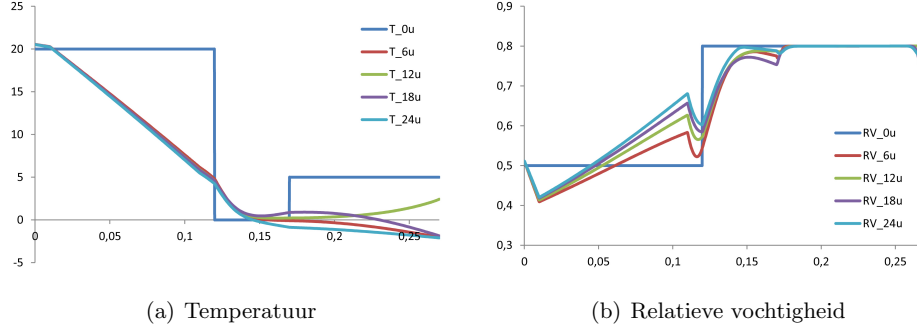
Figuur 5.14: Maximale zonnestraling bij helder weer (diffuus en direct, [W/m^2]) op een verticale westgevel (december) (Hens (1997)).

In tegenstelling tot de zomersituatie zal in de wintersituatie de onderkoeling van het buitenoppervlak wel plaatsvinden door warmteverliezen als een gevolg van de langegolfstraling naar de hemelkoepel wanneer er geen of nauwelijks bewolking is. Deze warmteverliezen worden als volgt in rekening gebracht:

$$q = -\epsilon \cdot C_b \cdot f_t \cdot F_{s,sky} \cdot T_{\Delta sky} \quad (5.9)$$

Met ϵ de emissiefactor gelijk aan 0,9, C_b de Stefan-Boltzmann constante, f_t de temperatuursfactor, $F_{s,sky}$ de hoekfactor vlak-hemelkoepel en $T_{\Delta sky}$ het temperatuurverschil tussen het vlak en de hemelkoepel. De temperatuursfactor is bij 20°C gelijk aan 1 en bij 0°C gelijk aan 0,82, de hoekfactor is gelijk aan 0,5 en het temperatuurverschil in de winter is ongeveer 20°C . Bij 0°C zijn de warmteverliezen naar de hemelkoepel dus ongeveer gelijk aan 42 W/m^2 . Aangezien de warmteverliezen naar de hemelkoepel overdag kleiner zijn door de hogere temperatuur van de hemelkoepel, wordt overdag het temperatuurverschil tussen het oppervlak en de hemelkoepel verondersteld gelijk te zijn aan nul. Anderzijds ziet men ook dat het aandeel van warmteverliezen (42 W/m^2) veel kleiner is dan het aandeel geabsorbeerde kortegolfstraling overdag.

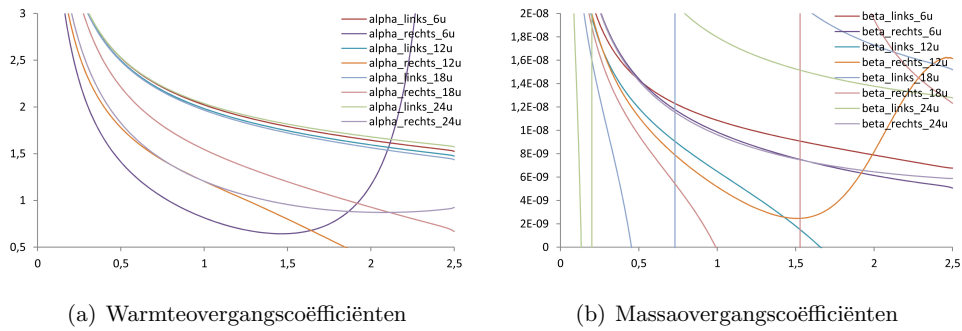
Fenomenen



Figuur 5.15: Temperatuur [°C] en relatieve vochtigheid [%] over de breedte van de spouw [m] op 2m hoogte voor de wintersituatie (CASE2) voor 1 dag om de 6u.

Voor het buitenspouwblad is de invloed van de warmteverliezen ten gevolge van de lange-golfstraling naar de hemelkoepel duidelijk waar te nemen (figuur 5.15). Na 12 uur is er een temperatuursstijging aan het buitenoppervlak ten gevolge van de invallende kortegolfstraling. Nadat de zon verdwenen is bij helder weer zijn er extra warmteverliezen naar de hemelkoepel waardoor de temperatuur daalt tot -2°C . Zoals hierboven aangetoond zijn de verliezen kleiner dan de warmtewinsten overdag waardoor deze teniet worden gedaan overdag. Dus bij buitentemperaturen net boven het vriespunt, kan een oppervlak toch bevroren ten gevolge van de warmteverliezen naar de hemelkoepel.

Overgangscoefficienten



Figuur 5.16: Warmte- [$\text{W/m}^2\text{K}$] en massa- [s/m] overgangscoefficienten over de hoogte van de spouw [m] op het linker en rechter spouwoppervlak voor de wintersituatie (CASE2) voor 1 dag om de 6 u.

Doordat de temperatuur aan het spouwoppervlak van het buitenspouwblad dicht aanleunt tegen de temperatuur van de spouwlucht van 0°C zijn de warmtefluxen klein. Dit in com-

binatie met de warmteverliezen naar de hemelkoepel zorgt ervoor dat de temperatuur in het buitenspouwblad ook negatief wordt, waardoor de warmtefluxen aan het buitenspouwoppervlak veranderen van teken en men op het rechter spouwoppervlak een afwijking van de warmteovergangscoefficiënt krijgt (figuur 5.16).

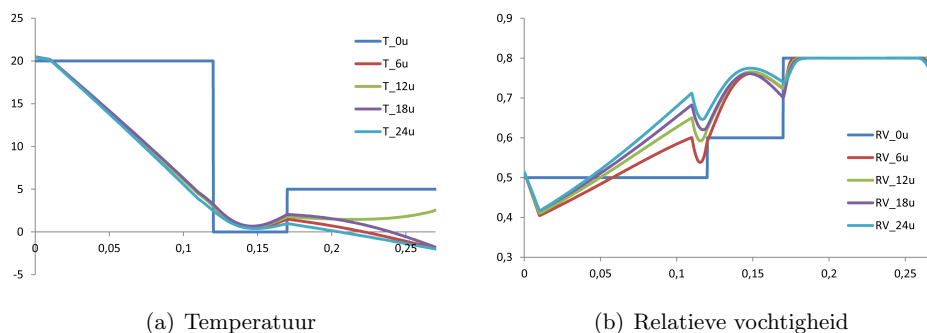
Voor de massaovergangscoefficienten is er ook een afwijking van de algemene trend. De verklaring hiervoor is identiek aan deze voor de warmteovergangscoefficienten: tekenverandering van de fluxen en extreem kleine fluxen.

5.2.4 CASE3

Randcondities

De randcondities van CASE3 zijn identiek aan deze van CASE2. Als bijhorende vorm van warmtetransport wordt de langegolfstraling in de spouw als gevolg van de temperatuurverschillen ook in rekening gebracht. Voor meer informatie hierover wordt verwezen naar (sectie 5.1.4).

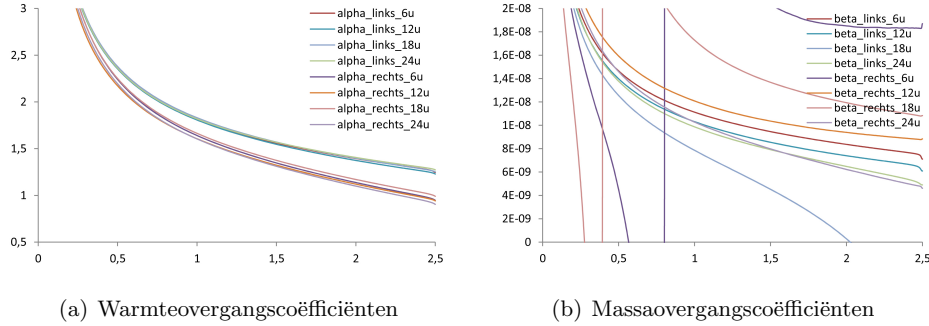
Fenomenen



Figuur 5.17: Temperatuur [°C] en relatieve vochtigheid [%] over de breedte van de spouw op 2m hoogte voor de wintersituatie (CASE1) voor 1 dag om de 6u.

Net als in de zomersituatie is het verschil in temperatuur tussen het binnen- en het buitenspouwoppervlak veel kleiner dan zonder de langegolfstraling in rekening te brengen (figuur 5.17). In de wintersituatie is het moeilijker voor de langegolfstraling om tot een gelijke temperatuur op het binnen- als het buitenspouwoppervlak te komen aangezien de temperatuursval over het binnenspouwblad al zodanig groot is. Een manier om deze temperatuursval te kunnen overbruggen is meer isolatie plaatsen en/of een isolatie materiaal plaatsen met een kleinere λ -waarde.

Overgangscoefficienten



Figuur 5.18: Warmte- $[W/m^2K]$ en massa- $[s/m]$ overgangscoefficienten over de hoogte van de spouw $[m]$ op het linker en rechter spouwoppervlak voor de wintersituatie (CASE1) voor 1 dag om de 6 u.

Voor de warmteovergangscoefficienten is er een verschil tussen het binnen- en het buitenspouwoppervlak waar te nemen als een gevolg van een temperatuurverschil (figuur 5.18). Dit temperatuurverschil is er als een gevolg van de te kleine warmteweerstand van het binnenspouwblad waardoor de temperatuur niet tot nul graden kan zakken.

Inzichten

In tegenstelling tot de zomersituatie is er wel degelijk nog een klein temperatuurverschil tussen het binnen- en het buitenspouwoppervlak als gevolg van de extreme temperatuursval over het binnenspouwblad.

5.3 Besluit

Bij een temperatuurverschil aan beide spouwoppervlakken door bijvoorbeeld extreme warmte- of massafluxen op het buitenspouwblad ontstaat er een verschil in de waarde van de overgangscoefficienten. Dit komt doordat bij een verschil in temperatuur of massafractie het snelheidsprofiel zich herverdeelt over de breedte van de spouw. Net als bij eerdere simulaties bleek al dat de temperatuur de grootste invloed uitoefent op de herverdeling van het snelheidsprofiel.

Als men nadien de invloed van de langegolfstraling in de luchtpouw in rekening brengt dan verkleint het temperatuurverschil tussen het linker en het rechter spouwoppervlak, doordat er warmtefluxen ontstaan van het warmere naar het koudere spouwoppervlak. Dit heeft als rechtstreeks gevolg dat het snelheidsprofiel meer symmetrisch wordt, waardoor de lokale snelheid zowel links als rechts in de spouw quasi gelijk is, dus ook de convectieve overgangscoefficienten aangezien deze bepaald worden door de lokale snelheid.

Hoofdstuk 6

Spouwventilatie in *WUFI-2D*

Uit hoofdstuk 5 is gebleken dat door de warmteuitwisseling als gevolg van de langegolfstraling beide spouwoppervlakken sneller op een gelijke of quasi gelijke temperatuur komen. Aangezien de temperatuur, naast de winddruk aan de inlaat, een grote invloed heeft op het snelheidsprofiel is de lokale snelheid aan het linker spouwoppervlak gelijk aan het rechter, dus ook de lokale warmte- en massaovergangscoefficiënt. Dus het verschil tussen de warmte- en massaovergangscoefficienten aan het linker en het rechter spouwblad wordt na verloop van tijd kleiner als een gevolg van de langegolfstraling tussen de spouwoppervlakken.

Aangezien de convectieve warmte- en vochtuitwisseling aan beide spouwoppervlakken zo goed als identiek is kan het effect van de langegolfstraling en convectie in *WUFI-2D* worden ingevoerd door de λ -waarde van de luchtlaag aan te passen naar een effectieve λ -waarde (λ_{eff}) van lucht. Deze λ_{eff} wordt bepaald bij *natuurlijke* convectie.

Bij grotere breedtes van de luchtspouw stijgt de λ_{eff} -waarde. Dit komt doordat bij bredere luchtspouwen er een groter aandeel natuurlijke convectie is waardoor er meer warmte wordt overgedragen. In de luchtspouw ontstaat door het temperatuursverschil tussen de twee spouwoppervlakken een circulaire luchtstroom die warmte aan het ene spouwoppervlak onttrekt en doorgeeft aan het andere spouwoppervlak. Door deze cirkelvormige luchtcirculatie is de snelheid aan het warmere spouwoppervlak positief en aan het koudere spouwoppervlak negatief. De grootte van de snelheid aan beide spouwoppervlakken is wel identiek, maar dus tegengesteld van teken. De grootte van de langegolfstraling is een constante. Bij grotere spouwbreedtes is het effect van convectie groter en bij kleinere spouwbreedtes het aandeel van geleiding groter.

Uit metingen wordt berekend wat de λ -waarde van de luchtspouw is bij een gegeven spouwbreedte voor een niet geventileerde luchtspouw. Eerst wordt de totale warmtedoorgangscoefficiënt (U) van de volledige spouwmuur opgemeten. Deze is de omgekeerde waarde van

de totale warmteweerstand van de spouwmuur:

$$U = \frac{1}{\Sigma R} \quad (6.1)$$

Met ΣR de som van alle warmteweerstanden van alle materiaal en lucht lagen. Aangezien de λ -waarde en de dikte van de andere materialen gekend is in combinatie met de temperaturen van de spouwoppervlakken kan men hieruit de λ_{eff} -waarde van de luchtlaag berekenen.

Om het effect van een geventileerde spouw te simuleren wordt in het model in *WUFI-2D* een extra warmte- en vochtbron aan de spouwlucht toegevoegd. De grootte ervan wordt bepaald door het ventilatievoud ($1/h$) en de buitencondities (relatieve vochtigheid en temperatuur) (sectie 2.4.2 en Karagiozis & Kuenzel (2009)). Hoe groter het ventilatievoud, hoe groter de warmte- en vochtbron. In theorie zal bij grotere snelheden de overgangscoefficiënt aan het oppervlak groter zijn door de dunnere grenslaag en de invloed van het de spouwbladen onderling kleiner. Dit fenomeen wordt in *WUFI-2D* dan vertaald in een grotere warmte- en vochtbron. Hierbij houdt *WUFI-2D* geen rekening met de verandering van de overgangscoefficienten over de hoogte van de spouw.

Om de correctheid van de manier waarop *WUFI-2D* een geventileerde spouw simuleert te onderzoeken wordt er identieke cases vergeleken zowel in *WUFI-2D* als in het gekoppeld CFD/HAM-model.

6.1 Modelleren in *WUFI-2D* en in het gekoppeld CFD/HAM-model

Om de te onderzoeken cases eenvoudig te houden worden voor de randcondities enkel een constante temperatuur en relatieve vochtigheid opgelegd en wordt er een periode van slechts 6 uur gesimuleerd.

In *WUFI-2D* wordt voor de geometrie de volledige spouw uitgetekend, inclusief de luchtsponw van 50 mm. Voor de luchtsponw wordt zoals eerder uitgelegd de λ_{eff} en μ_{eff} -waarde gebruikt voor stilstaande lucht bij enkel natuurlijke convectie. In de help functie van *WUFI-2D* zijn al deze waarden terug te vinden, zowel voor veel voorkomende bouwmaterialen met een emissiefactor van 0,9 als voor metallische materialen met een lagere emissiefactor.

Voor de randcondities is het niet voldoende om een constante temperatuur en relatieve vochtigheid op te geven, aangezien men voor het berekenen van de extra warmte- en vochtbron ten gevolge van de ventilatie ook de luchtdruk nodig heeft. Deze luchtdruk (1013 hPa) wordt dan gebruikt voor de massadichtheid van de lucht te berekenen. Voor de formules hieromtrent wordt verwezen naar de literatuurstudie. Als oplossing hiervoor wordt ervoor gekozen om een weerbestand te maken in .kli-formaat. Dit kan aan de hand van een tekst bestand of via

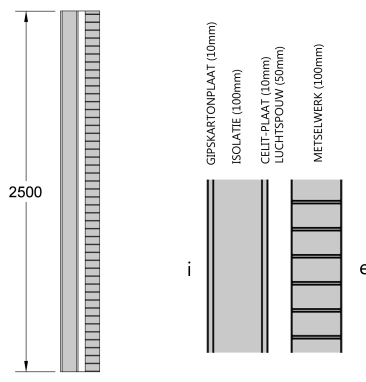
het *KLI-Create.exe*-bestand in de map *Tools* in de hoofdmap waar *WUFI-2D* geïnstalleerd is. Het ventilatievoud (Q_{air}) wordt berekend uit de gemiddelde snelheid in de spouw, met andere woorden de constante inlaatsnelheid van $0,2 \text{ m/s}$:

$$Q_{air} = \frac{v \cdot 3600}{h} \quad (6.2)$$

Toegepast op bijvoorbeeld een situatie bij een luchtsnelheid van $0,2 \text{ m/s}$ is het ventilatievoud gelijk aan 288 1/h .

6.1.1 Cases

Om de toepasbaarheid van het model voor gedwongen convectorie in *WUFI-2D* te valideren, worden er verschillende cases onderzocht. Voor de verschillende cases wordt dezelfde muuropbouw gebruikt (figuur 6.1).



Figuur 6.1: Opbouw van de spouwmuur.

Randcondities zomersituatie: case1 ($v = 0,2 \text{ m/s}$), case2 ($v = 0,1 \text{ m/s}$) en case3 ($v = 0,4 \text{ m/s}$):

	Binnenspouwblad	Luchtspouw	Buitenspouwblad
Temperatuur	20	25	30
Relatieve vochtigheid	50	60	80

Tabel 6.1: Initiële condities voor de zomersituaties.

Randcondities wintersituatie: case4 ($v = 0,2 \text{ m/s}$):

	Binnenspouwblad	Luchtspouw	Buitenspouwblad
Temperatuur	20	0	5
bfRelatieve vochtigheid	50	80	80

Tabel 6.2: Initiële condities voor de wintersituatie.

De inblaascondities en de buitencondities zijn identiek als deze van de luchtspouw. De temperatuur en relatieve vochtigheid binnen zijn respectievelijk gelijk aan 21°C en 50%.

		α	β
De overgangscoefficienten binnen en buiten zijn:	Binnen	8	$\alpha \cdot 7 \cdot 10^{-9}$
	Buiten	23	$\alpha \cdot 7 \cdot 10^{-9}$

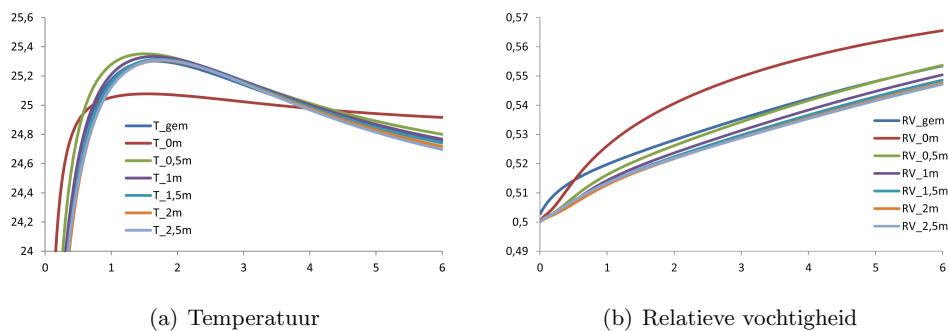
De materiaalkenmerken zijn terug te vinden in (bijlage B).

In het gekoppeld CFD/HAM-model worden dezelfde randcondities opgelegd in de vorm van warmte- en vochtfluxen. In tegenstelling tot *WUFI-2D* zullen de luchtstromingen wel uitgerekend worden, waardoor de resultaten uit het gekoppeld CFD/HAM-model correcter zijn.

6.2 Resultaten

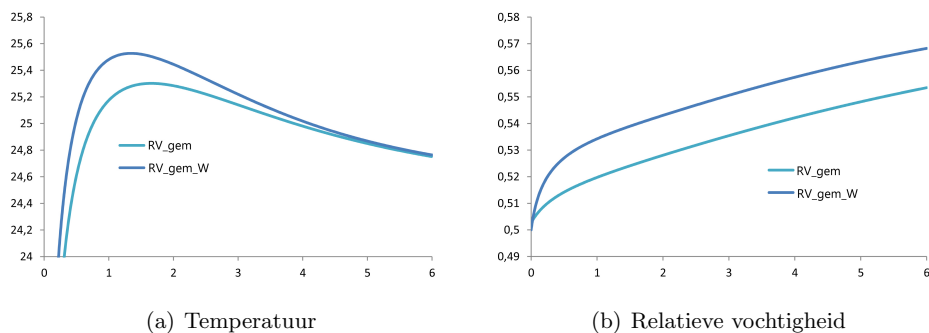
6.2.1 Variatie over de hoogte van de spouw

Voor de zomer situatie (case1) worden in het gekoppeld CFD/HAM-model de temperatuur en relatieve vochtigheid vergeleken in de *Celit*-plaat op verschillende hoogtes. Hierbij wordt enerzijds de oppervlakte gewogen gemiddelde waarde genomen over de volledige hoogte en anderzijds de lokale waarde centraal in de *Celit*-plaat op verschillende hoogtes (0m; 0,5m; 1m; 1,5m; 2m en 2,5m) (figuur 6.2). Daaruit blijkt dat de temperatuur en vochtigheid onderaan de spouw sneller stijgen als gevolg van de lokaal grotere overgangscoefficiënt. Doordat de temperatuur en relatieve vochtigheid in het midden van de *Celit*-plaat genomen wordt, treedt er een vertraging op tegenover de oppervlakte gewogen gemiddelde waarde. Op een hoogte van 0m treedt er een sterke afwijking op, dit komt doordat de overgangscoefficiënt daar lokaal oneindig groot is. In *WUFI-2D* wordt met deze twee dimensionale effecten geen rekening gehouden, maar wordt er enkel een dimensionaal gerekend. Dus de opwarming en bevochtiging van de spouwlucht hoger in de spouw wordt gemiddeld genomen over de volledige spouwhoogte.



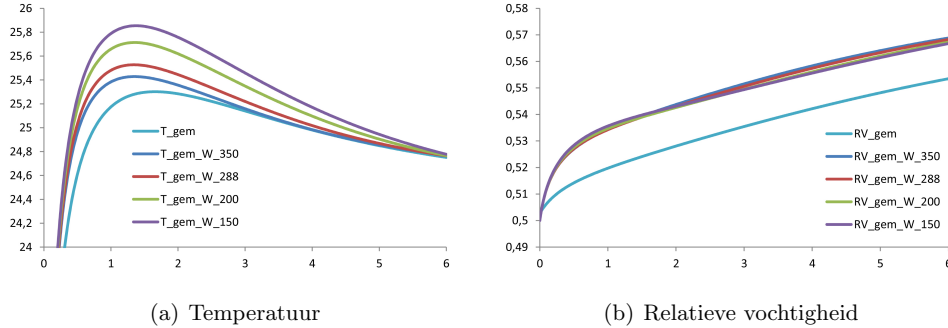
Figuur 6.2: Temperatuur [$^{\circ}\text{C}$] en relatieve vochtigheid [%] in de *Celit*-plaat op verschillende hoogtes en gemiddeld gedurende 6 uur, gesimuleerd met het gekoppeld CFD/HAM-model

Als men deze resultaten vergelijkt met de oppervlakte gewogen gemiddelde temperatuur en relatieve vochtigheid van de *Celit*-plaat uit *WUFI-2D* dan zijn er toch verschillen waar te nemen, zowel voor de temperatuur als de relatieve vochtigheid (figuur 6.3). Om de oorzaak van deze verschillen te onderzoeken zal het relatief belang van de verschillende parameters onderzocht worden. Eerst wordt het belang van het ventilatievoud onderzocht en ten tweede het belang van de λ_{eff} -waarde en de μ_{eff} -waarde van de lucht.



Figuur 6.3: Oppervlakte gewogen gemiddelde temperatuur [$^{\circ}\text{C}$] en relatieve vochtigheid [%] in de *Celit*-plaat gedurende 6 uur voor de zomersituatie (case1) bij een simulatie met het gekoppeld CFD/HAM-model en *WUFI-2D* (W)

6.2.2 Invloed van het ventilatievoud, de μ_{eff} -waarde en de λ_{eff} -waarde



Figuur 6.4: Oppervlakte gewogen gemiddelde temperatuur [°C] en relatieve vochtigheid [%] in de *Celit*-plaat gedurende 6 uur voor verschillende ventilatievouden in *WUFI-2D* (W) vergeleken met de simulatie in het gekoppeld CFD/HAM-model.

Bij alle cases kan men aannemen dat bij lagere ventilatievouden de invloed van het ene spouwblad op het andere spouwblad groter is (figuur 6.4). Dit komt doordat er minder warmte wordt afgevoerd uit de spouw. Zo ziet men bijvoorbeeld dat voor de zomersituatie de temperatuur initieel stijgt boven de 25°C als een gevolg van enerzijds een stijging van het vochtgehalte en anderzijds onder invloed van het buitenspouwblad. Na verloop van tijd zakt de temperatuur dan weer onder de 25°C onder invloed van het binnenklimaat van 21°C. Na verloop van tijd is het temperatuurverschil voor verschillende ventilatievouden kleiner doordat er een evenwicht ontstaat: 25°C in de spouw en 21°C binnen. Voor de relatieve vochtigheid ontstaan dezelfde fenomenen, maar minder uitgesproken doordat vocht moeilijker van het ene spouwoppervlak naar het andere wordt overgebracht. Warmte daarentegen kan ook via straling worden uitgewisseld in plaats van enkel door convectie en geleiding.

Voor de invloed van de μ_{eff} -waarde van de lucht ontstaan er verschillende fenomenen bij de verschillende cases. Zo krijgt men bij hogere μ_{eff} -waarden en een lagere λ_{eff} -waarden (hogere weerstand) resultaten die de resultaten uit het gekoppeld CFD/HAM-model beter benaderen, maar ook soms slechter. Dus er is op het eerste zicht geen vaste trend waar te nemen. Zo zal door de μ_{eff} -waarde van de lucht te vergroten de temperatuur en relatieve vochtigheid bijvoorbeeld beter overeen komen met de bekomen resultaten uit het gekoppeld CFD/HAM-model. Dit in tegenstelling tot het andere spouwblad waar de temperatuur en de relatieve vochtigheid slechtere resultaten geeft bij hogere warmte- en vochtweerstand in de lucht. Voor de λ_{eff} -waarde worden dezelfde resultaten bekomen, onafhankelijk van de verschillende snelheden en zomer of winter situatie.

Initieel is er dus een opgegeven temperatuurverschil tussen de twee spouwoppervlakken. Dit resulteert in een niet symmetrisch snelheidsprofiel, met andere woorden, de lokale snelheid

aan het ene spouwblad is verschillend van het andere spouwblad. Aan het koudere oppervlak (*Celit*-plaat) heeft de snelheid als een gevolg van de natuurlijke convectie een tegengesteld teken tegenover de snelheid als een gevolg van de gedwongen convectie. Dit betekent dat de totale snelheid lokaal aan het koudere oppervlak lager is dan de snelheid indien er enkel natuurlijke convectie toegepast wordt. De uitwisseling van vochtige lucht tussen de luchtspouw en de spouwbladen wordt enkel bepaald door convectie en diffusie. Het werkelijke aandeel van convectie is dan kleiner dan het aandeel convectie voorspeld door *WUFI*.

Dat betekent dus dat dit model in *WUFI* een misschatting van de fluxen maakt en slechts een goede benadering geeft indien de temperaturen aan beide spouwoppervlakken quasi gelijk zijn. Wanneer de temperaturen verschillend zijn, dan zijn de lokale warmte- en vochtuitwisseling aan de spouwoppervlakken verschillend. Deze temperatuurverschillen zorgen er voor dat in *WUFI* aan het koudere spouwoppervlak een overschatting van de warmte- en vochtfluxen wordt gemaakt.

Na verloop van tijd, wanneer de temperaturen aan beide spouwoppervlakken gelijk zijn, geeft het model in *WUFI-2D* gelijkaardige resultaten als het gekoppeld CFD/HAM-model, als gevolg van een symmetrisch snelheidsprofiel. Dit is te zien aan de gelijkmatige toename van de relatieve vochtigheid na 1 *u* in het gekoppeld CFD/HAM-model en in *WUFI-2D*.

Er zijn verschillende redenen voor een mogelijk temperatuurverschil tussen beide spouwoppervlakken:

- Een initieel temperatuurverschil als startconditie.
- Extreme warmtefluxen (zon) en/of koudefluxen (onderkoeling naar de hemelkoepel) op het buitenspouwblad .
- Slechte of weinig isolatie kan de temperatuursval over het materiaal niet volledig opnemen bij extreme buitentemperaturen ($<0^{\circ}\text{C}$).
- De spouwopbouw en de materiaal karakteristieken zoals de warmtecapaciteit en de λ -waarde. Zo zullen materialen met een verschillende warmtecapaciteit niet gelijkmatig opwarmen en door het toepassen van isolatie achter de *Celit*-plaat zal de warmte van buiten naar binnen worden opgeslagen op in de *Celit*-plaat als gevolg van de grote warmteweerstand van de isolatie (hoofdstuk 5).

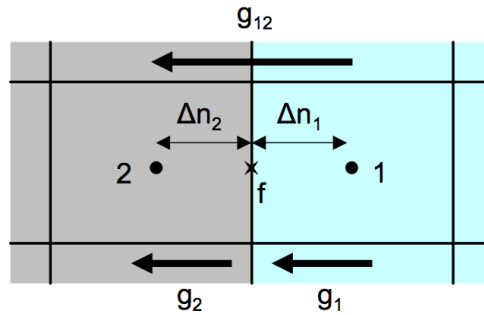
In *WUFI* is de λ_{eff} -waarde groter voor bredere spouwen. Gebruik makende van de formule ($R = \frac{d}{\lambda}$), is de weerstand (R) ongeveer gelijk voor alle spouwbreedtes, wat betekent dat het vooral de straling is die bepalend is voor de warmteoverdracht:

d	λ_{eff}	R
0,010	0,071	0,1408
0,010	0,13	0,1538
0,040	0,23	0,1730
0,100	0,59	0,1695

Tabel 6.3: Verschillende warmteweerstanden bij verschillende spouwbreedtes.

Dat zou betekenen dat in *WUFI* de warmteuitwisseling aan het spouwoppervlak tussen een spouwblad en een luchtspouw groter is bij bredere spouwen. Maar het is niet de λ_{eff} -waarde van de lucht die bepalend is voor de warmteuitwisseling aan de spouwoppervlakken, maar de λ -waarde van het materiaal, omdat de weerstand van warmte- en vochttransport in het materiaal groter is. Hetzelfde geldt voor de μ_{eff} -waarde. In een materiaal is de μ -waarde groter dan in de lucht, dus is het vochttransport in en uit de muur vooral bepaald door de materiaalkenmerken en minder door de convectie en diffusie in de lucht. Dus een misschatting van de μ_{eff} -waarde in *WUFI-2D* zal weinig consequenties hebben voor de bekomen resultaten, aangezien het vooral de materiaalkenmerken zijn die bepalend zijn.

Dit fenomeen wordt verduidelijkt via volgende afleiding (Steeman (2009)):



Figuur 6.5: Vochtflux (g) aan het spouwoppervlak tussen lucht(1) en een poreus materiaal (2) (Steeman (2009)).

Hierbij zijn de vochtfluxen g_1 , g_2 en g_{12} gelijk:

$$q_1 = \rho_1 D_1 \frac{Y_1 - Y_f}{\Delta n_1} = g_{12} = g_2 = \rho_2 D_2 \frac{Y_f - Y_2}{\Delta n_2} \quad (6.3)$$

In het geval dat $\Delta n_1 = \Delta n_2$ kan deze vergelijking worden omgevormd in volgende uitdrukking voor de oppervlakte waarde van de massafractie Y_f :

$$Y_f = \frac{\rho_1 D_1 Y_1 + \rho_2 D_2 Y_2}{\rho_1 D_1 + \rho_2 D_2} \quad (6.4)$$

De substitutie van vergelijking (6.4) in vergelijking (6.3) geeft dan:

$$g_1 = g_2 = \frac{2\rho_1 D_1 \rho_2 D_2}{\rho_1 D_1 + \rho_2 D_2} \frac{Y_1 - Y_2}{2\Delta n} = g_{12} \quad (6.5)$$

Hieruit blijkt dat de totale weerstand een gewogen gemiddelde is van beide weerstanden waarbij het vooral de grootste weerstand is die bepalend is.

Aangezien de randcondities in werkelijkheid constant veranderen zal er bij elke verandering een misschatting worden gemaakt. Hierdoor zal de relatieve vochtigheid bijvoorbeeld eerst teveel stijgen, maar na verandering van de grenscondities zal deze ook teveel zakken, waardoor de initiële stijging geneutraliseerd wordt. Dit verklaart de goede overeenkomst van het model met werkelijke metingen. Ook blijft de afwijking van de relatieve vochtigheid in *WUFI-2D* beperkt tot enkele procenten, wat dus zo goed als genegeerd kan worden.

6.3 Besluit

Samengevat kan men dus aannemen dat wanneer er zich geen noemenswaardige temperatuurverschillen voordoen tussen de spouwoppervlakken, het model om een geventileerde spouw in *WUFI-2D* te simuleren een goede benadering van de werkelijkheid geeft. Fysisch gezien is het model niet correct, maar het voldoet wel als benadering.

In *WUFI-2D* worden de λ_{eff} -waarden en μ_{eff} -waarden bepaald om de invloed van de spouwbladen onderling ook in rekening te brengen. Het is hierin dat er enkele fysische onjuistheden zitten. Een eerste fout is de verschillende λ_{eff} -waarden en μ_{eff} -waarden bij verschillende spouwbreedtes. Een tweede fout is dat de λ_{eff} -waarden en μ_{eff} -waarden bepaald worden bij natuurlijke convectie en niet bij gedwongen convectie. Een derde benadering in *WUFI-2D* is dat de λ_{eff} -waarden en μ_{eff} -waarden constant worden verondersteld over de breedte van de luchtspouw. Fysisch gezien variëren deze over de breedte van de luchtspouw, als gevolg van het snelheidsprofiel dat niet symmetrisch is. Doordat de λ - en μ -waarden van het materiaal vooral bepalend zijn voor de hoeveel warmte- en vochtuitwisseling aan het oppervlak, blijven deze fouten voor de warmte- en vochtuitwisseling aan het oppervlak beperkt.

Validatie met metingen daarentegen vertonen goede resultaten (Karagiozis & Kuenzel (2009) en Straube & Finch (2009)). Dit is te verklaren doordat men in de werkelijkheid slechts kleine temperatuurverschillen ervaart tussen de spouwoppervlakken. Indien er toch temperatuurverschillen tussen de spouwoppervlakken zijn, dan zal de temperatuur en de relatieve vochtigheid bij een wissel van richting van de warmte- en/of vochtflux bij bijvoorbeeld de wissel tussen dag en nacht gecompenseerd worden, doordat er telkens een onderschatting of een overschatting van de fluxen aan de spouwoppervlakken plaats vindt.

Hoofdstuk 7

Vocht- en warmteoverdracht tussen spouwbladen

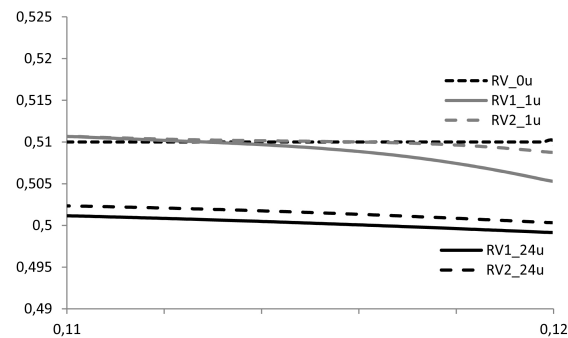
Zoals eerder vermeld in hoofdstuk 6 wordt op thermisch vlak de invloed van het ene spouwblad op het andere vooral bepaald door langegolfstraling, naast het kleine aandeel convectorie en conductie. Voor het vochttransport kan er geen beroep gedaan worden op straling dus vormen convectorie en diffusie de enige vormen van vochttransport. Dit fenomeen vertaalt zich fysisch in het vochtiger worden en/of opwarmen van de spouwlucht hoger in de spouw.

De exacte bijdrage van het buitenspouwblad op de verandering van de temperatuur en de vochtigheid van het binnenspouwblad wordt in dit hoofdstuk onderzocht (convectorie en conductie/diffusie, geen langegolfstraling).

In het laatste deel wordt dan aan de hand van *WUFI-2D* het verschil tussen verschillende materialen voor het buitenspouwblad onderzocht door middel van enkele jaarsimulaties en wordt het werkelijke verschil tussen een geventileerde tegenover een niet geventileerde spouw beoogd.

7.1 Gelijke initiële temperatuur, maar verschillende massafractie

Om de onderlinge invloed van spouwbladen te onderzoeken worden in een eerst simulatie beide spouwbladen en de inblaaslucht in de spouw initieel op één zelfde temperatuur van 20°C geplaatst. De relatieve vochtigheid van het binnenspouwblad, luchtspouw en buitenspouwblad bedragen initieel respectievelijk 51%, 50% en 80%. De inblaastemperatuur en relatieve vochtigheid bedragen respectievelijk 20°C en 50%. Aan het binnen- en het buitenoppervlak wordt een warmte- en een massaflux opgelegd die er voor zorgt dat de temperatuur en de massafractie aan die oppervlakken onveranderd blijft in de tijd.



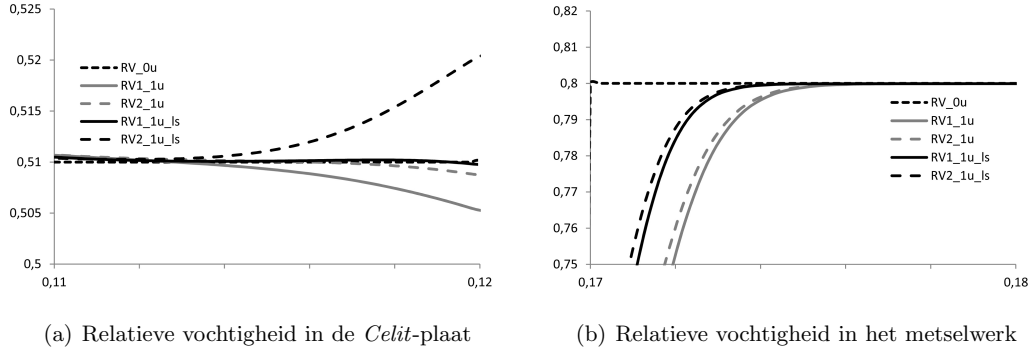
Figuur 7.1: Relatieve vochtigheid [%] in de *Celit*-plaat ($x=0,12$ [m]=spouwzijde) na 1 u en 24u op een hoogte van 1 m en 2 m

Bij een gelijke initiële temperatuur over de volledige spouwmuur is de relatieve vochtigheid na 1 u tijd minder gezakt op een hoogte van 2 m (RV2) dan op een hoogte van 1 m (RV1) in de *Celit*-plaat (figuur 7.1). Dit komt door de invloed van de grenslagen aan de spouwoppervlakken.

Na verloop van tijd droogt het metselwerk uit waardoor de relatieve vochtigheid aan het oppervlak van het metselwerk ongeveer gelijk is aan de relatieve vochtigheid van de inblaaslucht. Aangezien de relatieve vochtigheid in de luchtlaag vooral bepaald wordt door deze aan het oppervlak van het metselwerk wordt de invloed op de de *Celit*-plaat na uitdroging van het oppervlak kleiner. Als gevolg evolueert na verloop van tijd de relatieve vochtigheid in de *Celit*-plaat naar een relatieve vochtigheid van 50% (inblaascondities).

Zowel het metselwerk als de *Celit*-plaat drogen op 1 m hoogte (RV1) sneller uit dan op 2 m hoogte (RV2) (figuur 7.2(b)). Dit komt omdat de overgangscoefficienten onderaan veel groter zijn dan bovenaan, als een gevolg van de dunnere grenslaag. Hoe hoger in de spouw, hoe meer de lucht bevochtigd wordt, hoe dikker de grenslaag en dus hoe groter de invloed. Indien de luchtspouw oneindig lang zou zijn, dan zou de invloed op hogere hoogten aanzienlijker zijn als gevolg van de bevochtiging van de spouwlucht.

7.1.1 Lage snelheden (ls) in de luchtspouw



Figuur 7.2: Relatieve vochtigheid [%] in de *Celit*-plaat ($x=0,12$ [m]=spouwzijde) en het metselwerk ($x=0,17$ [m]=spouwzijde) op 1 m en 2 m hoogte voor 0,2 m/s en 0,1 m/s (ls).

Indien men bij een identieke spouwconfiguratie dezelfde randcondities voor de temperatuur en de relatieve vochtigheid neemt, maar de inlaatsnelheid halveert van 0,2 m/s naar een lage snelheid (ls) van 0,1 m/s ontstaan er gelijkaardige fenomenen (figuur 7.2).

Na één uur tijd is de relatieve vochtigheid aan de spouwzijde van het metselwerk hoger bij lage inlaatsnelheden dan bij hoge inlaatsnelheden. Dit komt doordat bij grote snelheden aan een materiaaloppervlak een materiaal sneller uitdroogt, hierdoor dalen de oppervlakte waarden van de relatieve vochtigheid van het metselwerk en de *Celit*-plaat ook sneller en dus ook de relatieve vochtigheid in de spouw lucht. Na verloop van tijd is de relatieve vochtigheid in de lucht hoger in de spouw ongeveer gelijk aan de inblaascondities doordat de oppervlak condities quasi gelijk zijn aan de temperatuur en relatieve vochtigheid van de inblaascondities.

Bij lagere snelheden is de grenslaag dus dikker waardoor de spouwbladen minder snel uitdrogen. Als gevolg daarvan is de relatieve vochtigheid in de luchtspouw en de *Celit*-plaat hoger.

Stel dat het buitenspouwblad een constante relatieve vochtigheid van 80% aanhoudt, dan zou als gevolg van het feit dat het metselwerk niet uitdroogt aan het spouwoppervlak, de invloed op de *Celit*-plaat groter moeten zijn. Om dit te onderzoeken wordt een simulatie gedaan over 24 u met dezelfde randcondities als in vorige case ($v = 0,2$ m/s), maar met het metselwerk op een constante relatieve vochtigheid van 80%. Hierbij is de invloed op 2 m duidelijk: stijging van de relatieve vochtigheid boven de initiële relatieve vochtigheid van 51%. Het is dus de combinatie van de grote van de oppervlakte relatieve vochtigheid en de dikte van de grenslagen die de grote van de invloed bepalen. Dit wil dus zeggen dat materialen die minder snel uitdrogen een grotere invloed uitoefenen, wel bij eenzelfde inlaatsnelheid wel te verstaan.

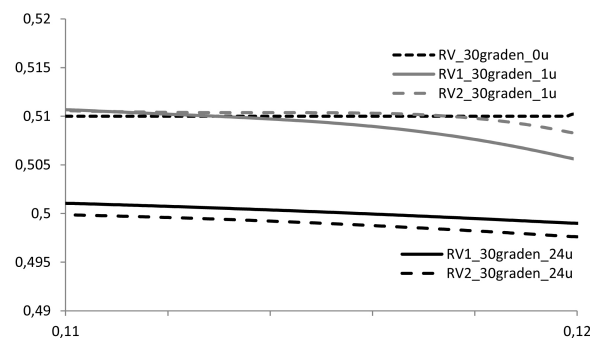


Figuur 7.3: Relatieve vochtigheid [%] in de *Celit*-plaat ($x=0,12$ [m]=spouwzijde) na 24 u op een hoogte van 1 m(1) en 2 m(2) bij een bij een buitenspouwblad uit metselwerk met een constante relatieve vochtigheid van 80%.

7.2 Verschillende initiële temperatuur en massafractie

In deze simulatie stijgt de temperatuur van het buitenspouwblad tot 30°C. De randcondities zijn identiek als deze in de eerste simulatie.

Bij een temperatuursverschil tussen buitenspouwblad en de luchtspouw oefenen de grenslagen voor warmteoverdracht tevens een invloed uit en zorgen voor een temperatuursverandering van het binnenspouwblad en dus ook voor een verandering van de relatieve vochtigheid. Hier wordt het effect van langegolfstraling niet in rekening gebracht. De randcondities zijn identiek als de situatie met gelijke randcondities, enkel de temperatuur van het buitenspouwblad wordt verhoogd tot 30°C.



Figuur 7.4: Relatieve vochtigheid [%] in de *Celit*-plaat ($x=0,12$ [m]=spouwzijde) na 1 u en 24 u op een hoogte van 1 m (RV1) en 2 m (RV2) bij een ongelijke temperatuursverdeling tussen de spouwbladen.

Op het eerste zicht worden dezelfde fenomenen waargenomen als in de vorige situatie, maar door de temperatuurstijging in de *Celit*-plaat als gevolg van de hogere temperatuur in het metselwerk doet er zich een daling van de relatieve vochtigheid voor die groter is op 2 m hoogte dan op 1 m hoogte (figuur 7.4).

7.3 Inzichten

In de onderzochte spouwconfiguratie met een spouwbreedte van 5 cm en de opgegeven randcondities voor de temperatuur en relatieve vochtigheid is er duidelijk een initiële invloed van het buitenspouwoppervlak op het binnenspouwblad waar te nemen. Initieel is de invloed op het binnenspouwblad groot maar na verloop van tijd verkleint de invloed doordat het metselwerk aan het spouwoppervlak uitdroogt. Bij hogere inblaassnelheden is de grenslaag nog dunner, waardoor de spouwoppervlakken nog sneller uitdrogen.

Na verloop van tijd is de relatieve vochtigheid in de luchtspouw ongeveer gelijk aan de inblaascondities, doordat de oppervlakcondities na uitdroging ook quasi gelijk zijn aan de temperatuur en relatieve vochtigheid van de inblaascondities. Indien men de relatieve vochtigheid in het metselwerk constant houdt op 80%, dan is de invloed op de *Celit*-plaat groter, doordat het metselwerk dan niet uitdroogt en de relatieve vochtigheid in de luchtspouw hoger blijft. Deze situatie komt dan bijvoorbeeld overeen met een materiaal dat minder snel uitdroogt.

Er moet wel opgemerkt worden dat in deze cases geen rekening wordt gehouden met langegolfstraling in de spouw, maar enkel de invloed van de grenslagen op de spouwbladen bij zuiver damptransport wordt bestudeerd.

7.4 Invloed van een gesatureerd buitenspouwblad

De grenslagen aan de spouwoppervlakken bepalen dus de grootte van de invloed van het buitenspouwblad op het binnenspouwblad. Hoe groter de overgangscoefficiënt, hoe sneller de uitdroging, hoe sneller de inblaascondities benaderd worden. Het behoud van een hoge relatieve vochtigheid aan het spouwoppervlak wordt bepaald door het type materiaal: hygroscopische of capillaire materialen of een combinatie van beide.

Hygroscopische materialen worden gekenmerkt door het feit dat ze al grote hoeveelheden vocht bevatten bij een lage relatieve vochtigheid. Capillaire materialen daarentegen zoals baksteen bevatten slechts relatief kleine hoeveelheden vocht bij een lage relatieve vochtigheid en relatief grote bij een relatieve vochtigheid dicht tegen de 100%. Dit wordt vertaald naar een sorptie-isotherm. Naast de sorptie-isotherm is ook de totale vochtdoorlatendheid, K , belangrijk. Deze vochtdoorlatendheid bepaalt hoe snel vocht van centraal in het materiaal

naar de uitdrogende oppervlakken kan getransporteerd worden. Deze vochtdoorlatendheid wordt bij een lage relatieve vochtigheid vooral bepaald door de μ -waarde en bij een hoge relatieve vochtigheid door het capillair vochttransport.

Door de combinatie van beide fenomenen (sorptie-isotherm en vochtdoorlatendheid) behoudt de oppervlakte relatieve vochtigheid bij het ene materiaal langer een hogere relatieve vochtigheid van ongeveer 100%, waardoor het spouwblad een grotere invloed uitoefent.

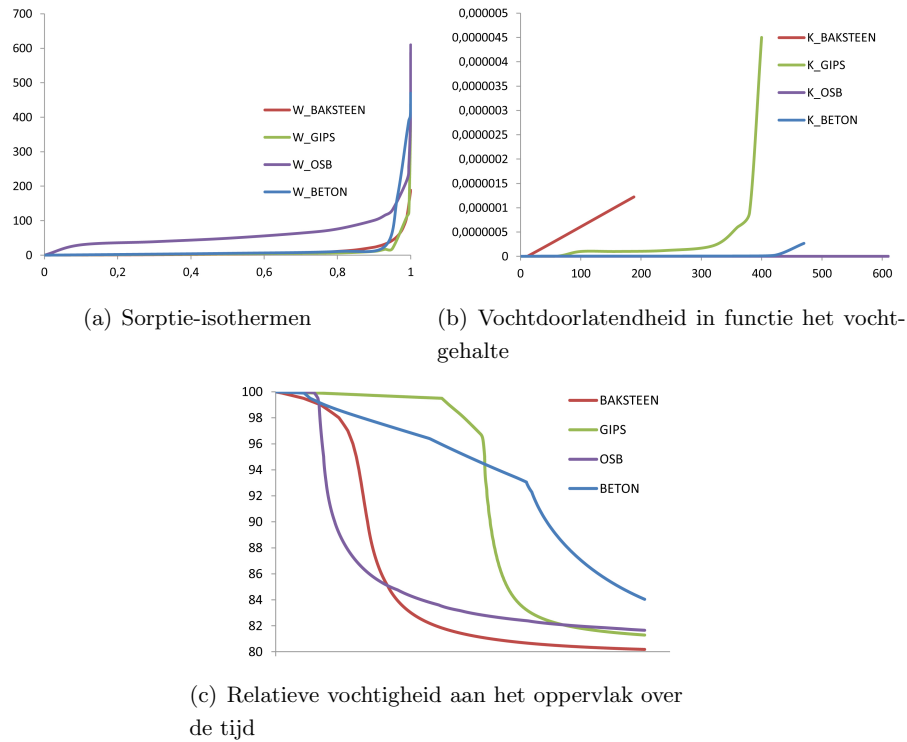
Aangezien we geïnteresseerd zijn in het gedrag van een quasi gesatureerd materiaal, na bijvoorbeeld een intense regenbui en doordat het huidige gekoppelde CFD/HAM-model geen vloeibaar vochttransport in rekening brengt maar enkel damptransport wordt via *WUFI-2D* de verandering van het oppervlakte vochtgehalte bestudeerd over de tijd vertrekkende van een gesatureerd ($\varphi = 100\%$) materiaal. Zo kan men dan bepalen hoe het materiaal zich zal gedragen bij uitdroging en dus de grootte van de invloed die het uitoefent op het andere spouwblad begroten. Net zoals bij andere *WUFI-2D* simulaties wordt de overgangscoefficiënt constant gehouden over het volledige oppervlak van het materiaal.

7.4.1 Uitdroging van een gesatureerd materialen in *WUFI-2D*

Om te beogen hoe een gesatureerd materiaal uitdroogt ($\varphi = 100\%$, $\Theta = 20^\circ\text{C}$) wordt gebruik gemaakt van een blok met afmeting $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ waarbij drie wanden adiabatisch zijn en één met opgegeven randcondities ($\varphi = 80\%$, $\Theta = 20^\circ\text{C}$). De overgangscoefficienten aan de niet-adiabatische wand zijn $\alpha = 2\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ en $\beta = \alpha \cdot 7 \cdot 10^{-9}$. Deze overgangscoefficienten komen ongeveer overeen met deze in een geventileerde spouw met een inlaatsnelheid van $0,2\text{ m/s}$ en een breedte van 5 cm . Na de simulaties wordt de relatieve vochtigheid vergeleken bij de drie verschillende materialen aan de rand van de niet-adiabatische wand.

Resultaten

De gipskarton-plaat behoudt langer een hoge relatieve vochtigheid dan bijvoorbeeld een OSB-plaat, beton of metselwerk. Dit komt enerzijds door de hoge vochtdoorlatendheid van gips bij een hoge relatieve vochtigheid waardoor vocht gemakkelijker wordt aangevoerd van centraal in het materiaal naar de uitdroogzone en anderzijds door de hoge w_{sat} (figuur 7.5(b)). Aangezien gips en een OSB-plaat bij een relatieve vochtigheid van 100% hun sterkte en stijfheid verliezen, zijn we minder geïnteresseerd in deze materialen. Beton blijft initieel langer op een relatieve vochtigheid van 100%. Dit komt door de grote waarde van w_{sat} en de sterke stijging van het vochtgehalte bij een grote relatieve vochtigheid dicht bij de 100%. Bij baksteen is de w_{sat} (figuur 7.5(b)) veel kleiner dan bij beton waardoor er minder vocht moet afgevoerd worden om de relatieve vochtigheid aan het oppervlak te verlagen. Dus de veel hogere vochtdoorlatendheid van metselwerk tegenover beton is niet voldoende om die droging aan het oppervlak tegen te werken.



Figuur 7.5: Verloop van de relatieve vochtigheid [%] aan het oppervlak van de verschillende materialen bij uitdroging in functie van de tijd als gevolg van de karakteristieke sortie-isotherm en de vochtdoorlatendheid (K).

In dit eindwerk werd er gewerkt met een licht metselwerk ($\rho = 600 \text{ kg/m}^3$), wat een initiële vergissing was. Om een vergelijking te kunnen maken met een gelijkaardig soort beton, wordt er dus ook gekozen met een beton met eenzelfde massadichtheid. Normaal gezien bedraagt de massadichtheid van metselwerk en beton rond de 2000 kg/m^3 , met als gevolg dat de hoeveelheid vocht initieel lager is dan bij een minder dens metselwerk en dus sneller uitdroogt. Aangezien we in de vorige simulaties met een relatieve vochtigheid van minder dan 100% werkten, is het verschil in vochtgehalte bij een dergelijke relatieve vochtigheid tussen beide materialen ($\rho = 600 \text{ kg/m}^3$ VS. $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$) klein, waardoor de resultaten van vorige simulaties nog altijd van toepassing zijn.

Een minder dens materiaal heeft tevens tot resultaat dat de warmteweerstand groter is. Twee buitenspouwbladen met een identieke sorptie-isotherm en vochtdoorlatendheid, maar andere warmteweerstanden en warmtecapaciteiten zorgen voor een andere relatieve vochtigheid van het binnenspouwblad, doordat meer of minder warmte van het buitenspouwblad wordt overgebracht naar het binnenspouwblad voornamelijk door middel van de langegolfstraling. Een materiaal met een grote warmtecapaciteit behoudt langer een hoge temperatuur, dan een materiaal met een lage warmtecapaciteit bij dezelfde warmteafname. Hierdoor wordt er meer

warmte overgedragen naar het andere spouwblad. Bij een grote warmtecapaciteit daarentegen is er wel meer energie (warmte) nodig voor eenzelfde temperatuursstijging. Deze fenomenen worden geïllustreerd aan de hand van volgende formule:

$$Q = mc\Delta T = C\Delta T \quad (7.1)$$

Met Q de toegevoegde warmtehoeveelheid, m de massa van de substantie, c de soortelijke warmte en ΔT de temperatuurverandering en C de warmtecapaciteit. Dit is opnieuw een voorbeeld dat warmte en vocht niet van elkaar los te koppelen zijn.

7.4.2 Inzichten

Om de invloed van een gesatureerd buitenspouwblad op het binnenspouwblad te voorspellen moet men het verloop van de sortie-isotherm, de vochtdoorlatendheidscurve en het initiële (saturatie) vochtgehalte van het buitenspouwblad kennen. Naast deze materiaalkenmerken (sortie-isotherm, de vochtdoorlatendheidscurve en het initiële vochtgehalte) zijn ook de dikte van het buitenspouwblad en de buitencondities belangrijk.

Hetzelfde geldt voor de temperatuur: hoe groter de λ -waarde hoe makkelijker de warmte wordt toegevoerd uit het materiaal naar het oppervlak van het materiaal. Dit in combinatie met de warmtecapaciteit van het materiaal bepaalt de grootte van de invloed. Zo zal een materiaal met een grote warmtecapaciteit meer warmte moeten ontvangen of afgeven om een temperatuursverandering te ondergaan.

Aangezien warmte en vocht niet van elkaar los te koppelen zijn moet men om het systeem volledig te begrijpen de sortie-isotherm, de vochtdoorlatendheidscurven en het saturatie vochtgehalte kennen en anderzijds ook de vochtgevoeligheid van de λ -waarde in combinatie met de warmtecapaciteit van het materiaal. Dit illustreert de noodzaak naar correcte simulatieprogramma's aangezien er teveel parameters zijn die de invloed bepalen.

7.5 Jaarsimulatie in *WUFI-2D*: geventileerd VS. niet-geventileerd

Zoals aangetoond in hoofdstuk 6 geeft het model in *WUFI-2D* om een geventileerde spouw te simuleren een goede benadering van de werkelijkheid. Daarom wordt er in deze sectie gebruik gemaakt van *WUFI-2D* om het verschil aan te tonen tussen de invloed van een spouwmuur met een nat buitenspouwblad en een minder nat buitenspouwblad op de relatieve vochtigheid van het binnenspouwblad. Als parameters om dit te onderzoeken worden de temperatuur en relatieve vochtigheid van het de *Celit*-plaat vergeleken bij verschillende jaarsimulaties in *WUFI-2D*.

Om dit te onderzoeken worden twee cases onderzocht:

- Situatie 1: spouwmuur *met* regenwater absorptie van het buitenspouwblad (regen).
- Situatie 2: spouwmuur *zonder* regenwater absorptie van het buitenspouwblad (droog).

7.5.1 Randcondities

Om een onderscheid te maken tussen een buitenspouwblad die onder invloed staat van invallende regen en een spouwblad die enkel onder invloed is van de temperatuur en de relatieve vochtigheid van buiten wordt de *rain reduction factor* aangepast. Voor situatie 1 (regen) wordt de *rain reduction factor* gelijk gesteld aan 0,7 en voor situatie 2 (droog) gelijk aan 0. De waarde van 0,7 komt overeen met de *rain reduction factor* voor een verticale muur (Künzel (2011)).

De initiële condities in de spouw komen overeen met een wintersituatie, aangezien er gesimuleerd wordt startende vanaf 1 januari 2010:

	Binnenspouwblad	Luchtspouw	Buitenspouwblad
Temperatuur	20	0	5
Relatieve vochtigheid	50	80	80

Tabel 7.1: Initiële condities voor de wintersituaties.

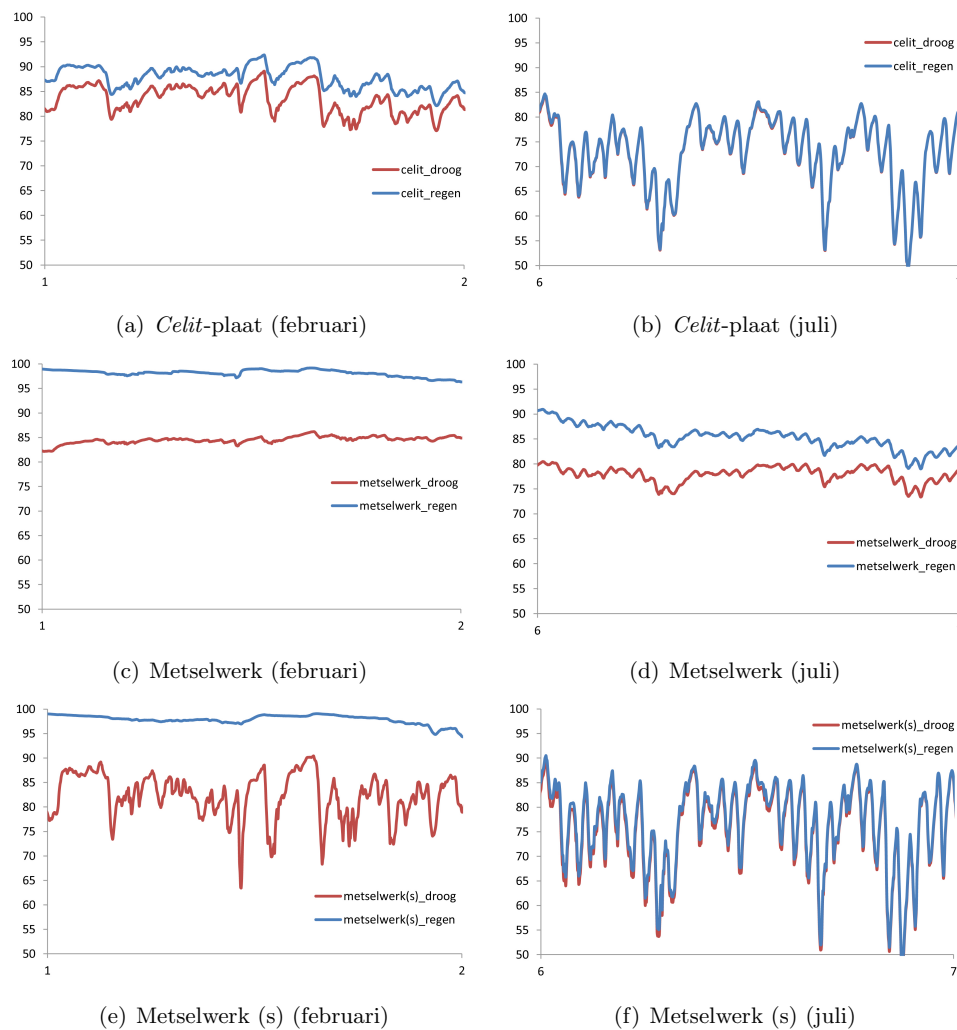
De temperatuur en relatieve vochtigheid binnen zijn respectievelijk gelijk aan 21°C en 50%.

		α	β
De overgangscoefficienten binnen en buiten zijn:	Binnen	8	$\alpha \cdot 7 \cdot 10^{-9}$
	Buiten	23	$\alpha \cdot 7 \cdot 10^{-9}$

De randcondities buiten worden bepaald door de weerbestand van Brussel (straling, relatieve vochtigheid en temperatuur). Het ventilatievoud komt overeen met een ventilatievoud bij een inlaatsnelheid van 0,2 m/s: 288 1/h, gelinkt aan de buitencondities.

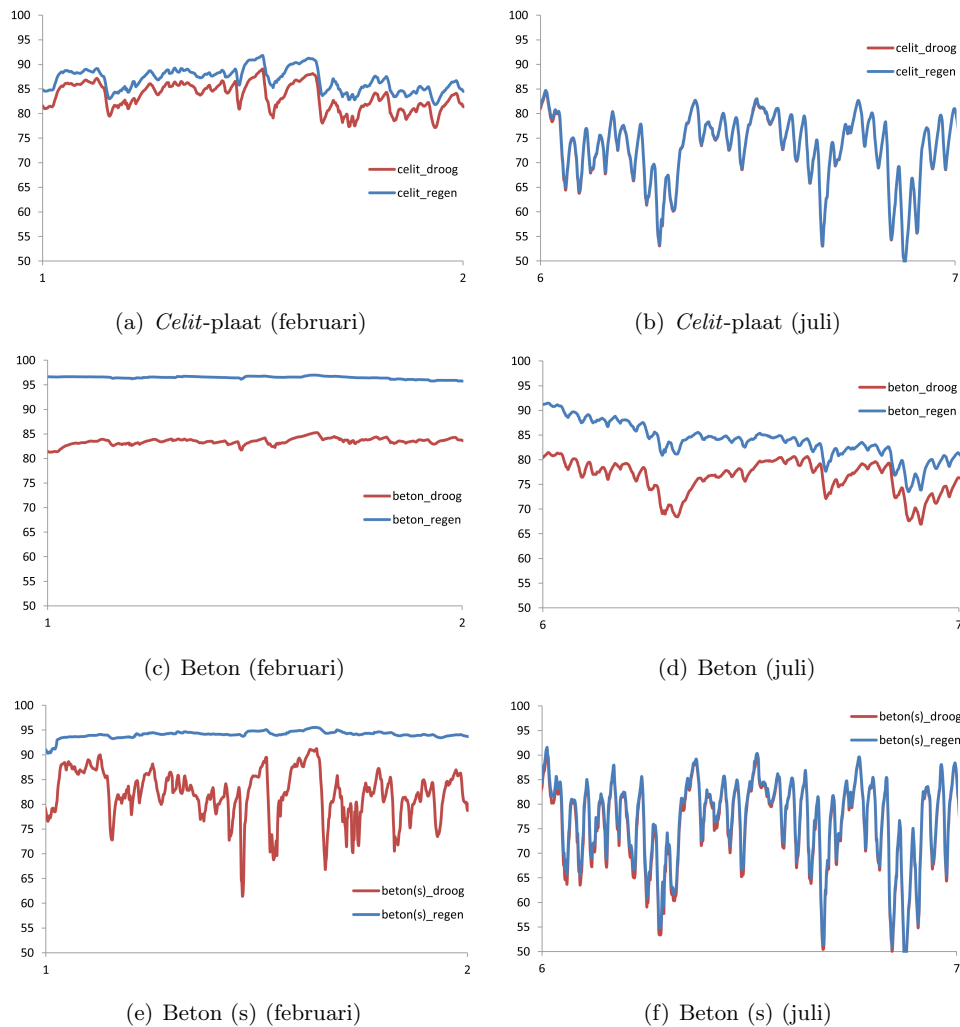
7.5.2 Geventileerde luchtspouw

Na de simulatie over één jaar wordt de oppervlak gewogen gemiddelde relatieve vochtigheid vergeleken in de *Celit*-plaat (figuur 7.6). Voor de wintersituatie (februari) is er duidelijk een verschil van ongeveer 5% waar te nemen tussen de twee situaties (regen en geen regen op het buitenspouwblad). In de zomersituatie daarentegen (juli) is er zo goed als geen verschil waar te nemen in relatieve vochtigheid. Dit is te verklaren doordat in de zomer zowel het binnen- als het buitenspouwblad uitdrogen als gevolg van de spouwventilatie. In de zomer wordt de relatieve vochtigheid in de *Celit*-plaat dus vooral bepaald door de relatieve vochtigheid van de ventilerende buitenlucht.



Figuur 7.6: Verloop van de relatieve vochtigheid [%] in functie van de tijd [maand] in de *Celit*-plaat, het metselwerk en aan het oppervlak van het metselwerk (s(urface)).

Indien er voor het buitenspouwblad in plaats van voor metselwerk voor beton gekozen wordt, wordt er zoals eerder besproken verwacht dat de invloed groter is aangezien beton langer vocht vasthoudt. Toch is er weinig verschil in relatieve vochtigheid in de *Celit*-plaat tussen de toepassing van metselwerk en beton als buitenspouwblad (figuur 7.7). Dit komt doordat de relatieve vochtigheid in de spouwmuur vooral bepaald wordt door de relatieve vochtigheid van de buitenlucht, doordat het buitenspouwblad aan twee zijden kan uitdrogen, waardoor de droging sneller gebeurt. Dit zorgt ervoor dat de relatieve vochtigheid zowel in het metselwerk als in het beton ongeveer gelijk is met als gevolg dat de invloed van het buitenspouwblad op het binnenspouwblad dus ook quasi gelijk is.



Figuur 7.7: Verloop van de relatieve vochtigheid [%] in functie van de tijd [maand] in de *Celit*-plaat, het beton en aan het oppervlak van het beton (s(urface)).

7.5.3 Niet-geventileerde luchtspouw

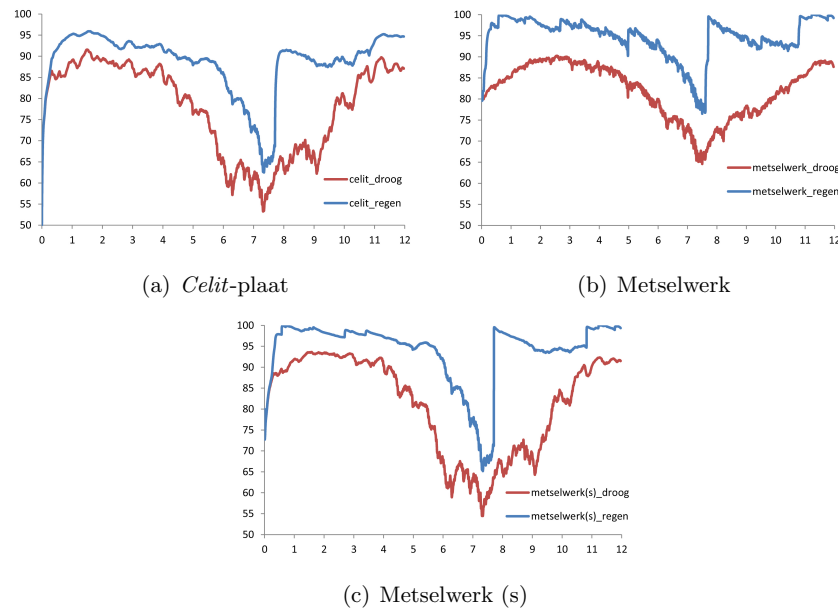
Als de luchtspouw niet geventileerd wordt, dan drogen het binnenspouwblad en het buitenspouwblad minder snel uit (figuur 7.8). Hierdoor is er een verschil in relatieve vochtigheid in de *Celit*-plaat in de zomer tussen beide situaties (regen en geen regen op het buitenspouwblad). Bij een geventileerde spouw daarentegen is de relatieve vochtigheid aan het buitenspouwoppervlak en in de *Celit*-plaat gelijk, als gevolg van de droging aan de spouwoppervlakken

De relatieve vochtigheid van het buitenspouwblad is over het ganse jaar ongeveer gelijk aan die van het binnenspouwblad (*Celit*-plaat), wat dus aantoont dat het buitenspouwblad de

relatieve vochtigheid van het binnenspouwblad sterk bepaalt.

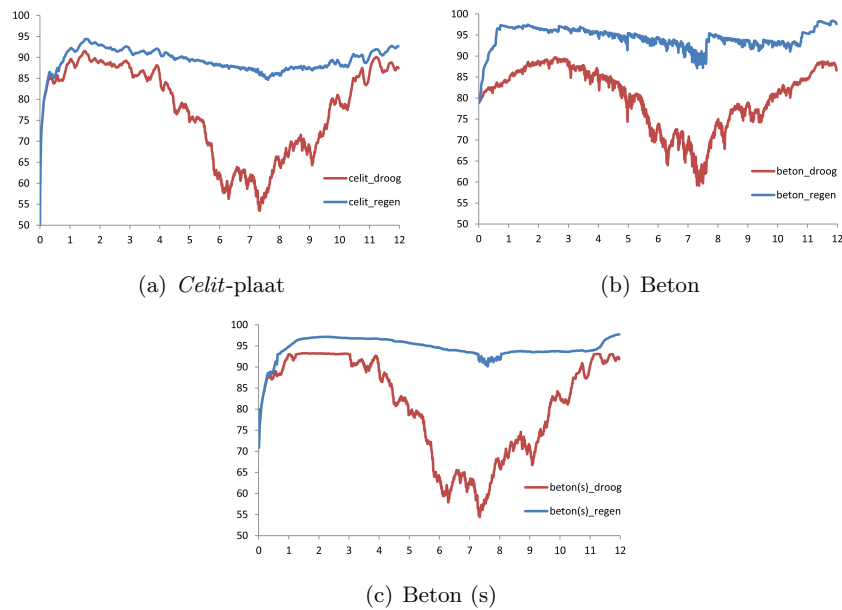
Doordat het buitenspouwblad minder snel uitdroogt dan bij een geventileerde spouw is de relatieve vochtigheid van het buitenspouwblad hoger, dus ook de invloed op het binnenspouwblad wat resulteert in een hogere relatieve vochtigheid van het binnenspouwblad.

Deze algemene inzichten werden ook reeds bekomen in (Karagiozis & Kuenzel (2009) en Rodrigues & Aelenei (2009)).



Figuur 7.8: Verloop van de relatieve vochtigheid [%] gedurende 1 jaar in de *Celit*-plaat, het metselwerk en aan het oppervlak van het metselwerk (s(urface)).

Er is wel een verschil tussen de toepassing van metselwerk en beton als buitenspouwblad bij een niet geventileerde spouw, vooral in de zomer aangezien de droging dan het grootst is (figuur 7.9). Zo benadert baksteen beter de curve van de relatieve vochtigheid van de buitenlucht dan beton, doordat beton minder snel vocht afgeeft. Dus in tegenstelling tot een geventileerde spouw is er in de zomer bij een niet geventileerde wel een grote invloed van het buitenspouwblad op het binnenspouwblad, doordat het buitenspouwblad minder snel uitdroogt. Deze resultaten zijn wel klimaat afhankelijk, wat dus weer wijst op het belang van simulatie programma's, naast dure en tijdrovende metingen.



Figuur 7.9: Verloop van de relatieve vochtigheid [%] gedurende 1 jaar in de *Celit*-plaat, het beton en aan het oppervlak van het beton (s(urface)).

7.6 Besluit

Om de invloed van een gesatureerd buitenspouwblad op het binnenspouwblad te voorspellen moet men inzicht hebben in het verloop van de sortie-isotherm, de vochtdoorlatendheidscurve en het initiële (saturatie) vochtgehalte van het buitenspouwblad. Naast deze materiaalkenmerken (sortie-isotherm, de vochtdoorlatendheidscurve en het initiële vochtgehalte) zijn ook de dikte van het buitenspouwblad en de buitencondities belangrijk.

Hetzelfde geldt voor de temperatuur: hoe groter de λ -waarde hoe makkelijker de warmte wordt toegevoerd uit het materiaal naar het oppervlak van het materiaal waar het uitdroogt. Dit in combinatie met de warmtecapaciteit van het materiaal bepaalt de grootte van de invloed. Zo zal een materiaal met een grote warmtecapaciteit meer warmte moeten ontvangen of afgeven om een temperatuursverandering te ondergaan.

Al deze eigenschappen verschillen van materiaal tot materiaal. Dit bewijst onmiddellijk het praktische nut van bestaande simulatie modellen om hun gedrag te voorspellen.

Het is vooral in de wintersituatie dat er een invloed van het buitenspouwblad op het binnenspouwblad is bij een geventileerde luchtsponw. Dit komt doordat in de zomer het buiten- en binnenspouwblad uitdrogen aan het spouwoppervlak, waardoor de invloed verkleint. Hierdoor is het vooral de relatieve vochtigheid van de ventilerende buitenlucht die de relatieve vochtigheid in de *Celit*-plaat bepaalt.

Als het buitenspouwblad niet uit metselwerk wordt opgebouwd, maar uit beton, dat langer een hoge relatieve vochtigheid aanhoudt, wordt er een grotere invloed van het buitenspouwblad op het binnenspouwblad verwacht, maar door de grote droging van het buitenspouwblad wordt tevens de relatieve vochtigheid van de ventilerende buitenlucht beter benadert.

Indien de luchtspouw niet geventileerd wordt, dan is de droging van het binnen- en het buitenspouwblad kleiner. Hierdoor drogen het beton en het metselwerk minder snel waardoor er langer een hoger relatieve vochtigheid wordt aangehouden in de zomersituatie. In ons klimaat is de toepassing van een geventileerde spouw dus beter om condensatie te vermijden, maar in een ander klimaat (vochtig en warm) kan dit daarentegen nadelig zijn. Deze resultaten zijn dus sterk klimaat afhankelijk en moeten situatie per situatie apart bekeken en dus gesimuleerd worden.

Hoofdstuk 8

Aangepast CFD/HAM-model

In dit laatste onderdeel worden de mogelijkheden en beperkingen van het gekoppeld CFD/HAM-model onderzocht aan de hand van enkele cases. Het model wordt verder aangepast om het mogelijk te maken simulaties te doen over enerzijds een langere periode en anderzijds met variabele randcondities zoals in *WUFI-2D* wordt gedaan aan de hand van een weerbestand. Door het mogelijk te maken de randcondities te laten variëren per tijdstap ontstaan er simulaties die beter de werkelijkheid benaderen.

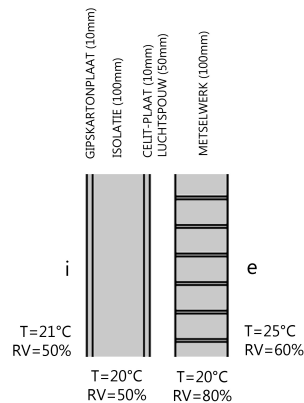
Eerst wordt er een eenvoudige (constante randcondities) dagsimulatie gedaan in het gekoppeld CFD/HAM-model om de verschillende trends af te leiden die zich zowel voordoen in de zomer als de wintersituatie. Daarna wordt een weeksimulatie gedaan in het aangepaste (variabele randcondities) CFD/HAM-model die overeenkomt met de laatste week van het jaar (2010) in Brussel, aangezien in de winterperiode zich de grootste kans op condensatie voordoet. In het laatste deel van dit hoofdstuk wordt de invloed van een dampscherm aan de binnenzijde op het vochttransport over de spouwmuur beoogd.

8.1 *Celit*-plaat VS. OSB-plaat: eenvoudige dagsimulatie

8.1.1 Zomersituatie

Randcondities

Voor de randcondities voor de zomersituatie wordt verwezen naar (figuur 8.1).



Figuur 8.1: Spouwopbouw en randcondities voor de zomersituatie.

De inblaascondities zijn identiek als deze van de buitencondities. Aan het buitenoppervlak wordt nog een extra warmteflux in rekening gebracht die overeenkomt met de maximale zonnestraling bij helder weer (diffuus en direct) op een verticaal vlak voor de westgevel in de maand juni (figuur 8.2).

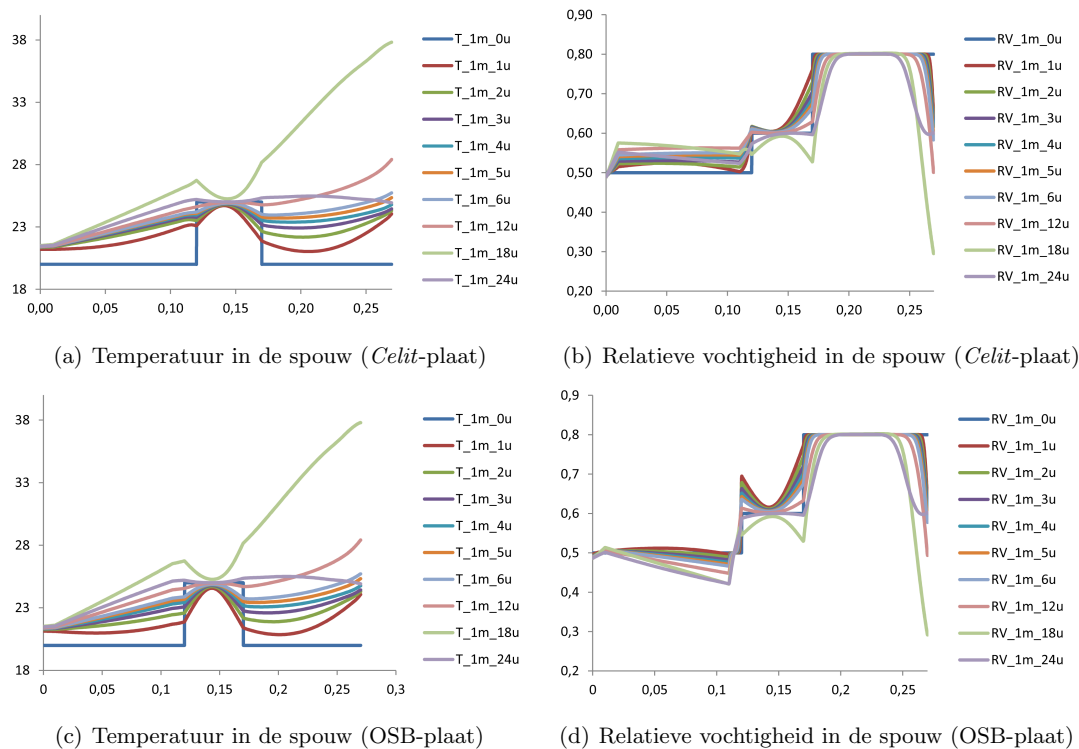
Verticaal vlak ($s=90^\circ$), west($a_s=90^\circ$)												
uur ↓	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
4.0	0	0	0	0	0	11	4	0	0	0	0	0
5.0	0	0	0	2	26	32	28	13	0	0	0	0
6.0	0	0	0	29	41	44	42	35	20	0	0	0
7.0	0	0	27	43	50	52	50	46	38	24	0	0
8.0	6	25	40	51	56	58	57	53	47	38	23	7
9.0	26	38	49	57	62	63	62	59	54	47	36	26
10.0	37	47	56	65	69	70	69	67	63	56	45	37
11.0	47	56	67	76	81	82	80	77	74	67	55	46
12.0	75	77	106	148	162	145	130	134	157	169	141	98
13.0	100	244	297	349	362	336	323	334	347	335	265	201
14.0	266	370	455	514	529	512	500	502	499	445	312	230
15.0	222	397	539	615	631	621	613	610	579	440	231	147
16.0	0	274	485	623	661	661	657	641	535	274	0	0
17.0	0	0	262	476	583	616	614	550	321	0	0	0
18.0	0	0	0	198	368	453	447	315	0	0	0	0
19.0	0	0	0	0	109	211	200	57	0	0	0	0

Figuur 8.2: Maximale zonnestraling bij helder weer (diffuus en direct, $[W/m^2]$) op een verticale westgevel (juni) (Hens (1997)).

		α	β
De overgangscoëfficiënten binnen en buiten zijn:	Binnen	8	$\alpha \cdot 7 \cdot 10^{-9}$
	Buiten	23	$\alpha \cdot 7 \cdot 10^{-9}$

De materiaalkenmerken zijn terug te vinden in (bijlage B).

Resultaten



Figuur 8.3: Temperatuurprofiel [°C] en profiel van de relatieve vochtigheid [%] over de breedte van de spouwmuur [m] op 1 m hoogte bij de toepassing van een *Celit*-plaat en een OSB-plaat tijdens een zomersituatie.

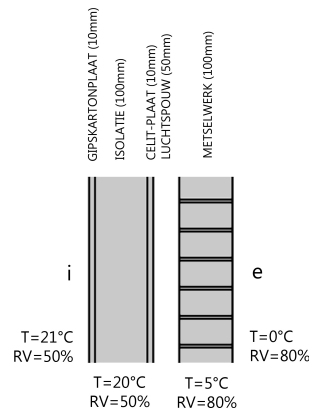
De relatieve vochtigheid in de OSB-plaat stijgt lokaal boven de 60%, desondanks de grenscondities 60% bedragen (figuur 8.3(d)). Dit komt doordat het vocht als gevolg van de grote diffusie weerstand (μ -waarde) van de OSB-plaat moeilijker getransporteerd wordt doorheen het materiaal waardoor het lokaal opgeslagen wordt in de *Celit*-plaat. Als gevolg van de temperatuurstijging zakt de relatieve vochtigheid dan weer wat, maar blijft wel lokaal hoger dan bij toepassing van een *Celit*-plaat.

Als gevolg van de lagere λ -waarde van de *Celit*-plaat zou men verwachten dat de temperatuur in de isolatie initieel minder snel stijgt, maar door de lage μ -waarde van de *Celit*-plaat stijgt de vochtigheid sneller, dus ook de temperatuur als gevolg van de warmtecapaciteit van vocht (figuur 8.3). Hierdoor stijgt de relatieve vochtigheid in de isolatielaag bij de constructie met de *Celit*-plaat meer dan bij de OSB-plaat. Bij de OSB-plaat zakt de relatieve vochtigheid in de isolatielaag als een gevolg van een temperatuurstijging en de grotere diffusie weerstand van de OSB-plaat.

8.1.2 Wintersituatie

Randcondities

Voor de randcondities voor de wintersituatie wordt verwezen naar (figuur 8.4).



Figuur 8.4: Spouwopbouw en randcondities voor de wintersituatie.

De inblaascondities zijn identiek als deze van de buitencondities. Aan het buitenoppervlak wordt ook nog een extra warmteflux in rekening gebracht die overeenkomt met de maximale zonnestraling bij helder weer (diffuus en direct) op een verticaal vlak voor de westgevel in de maand juni (figuur 8.5).

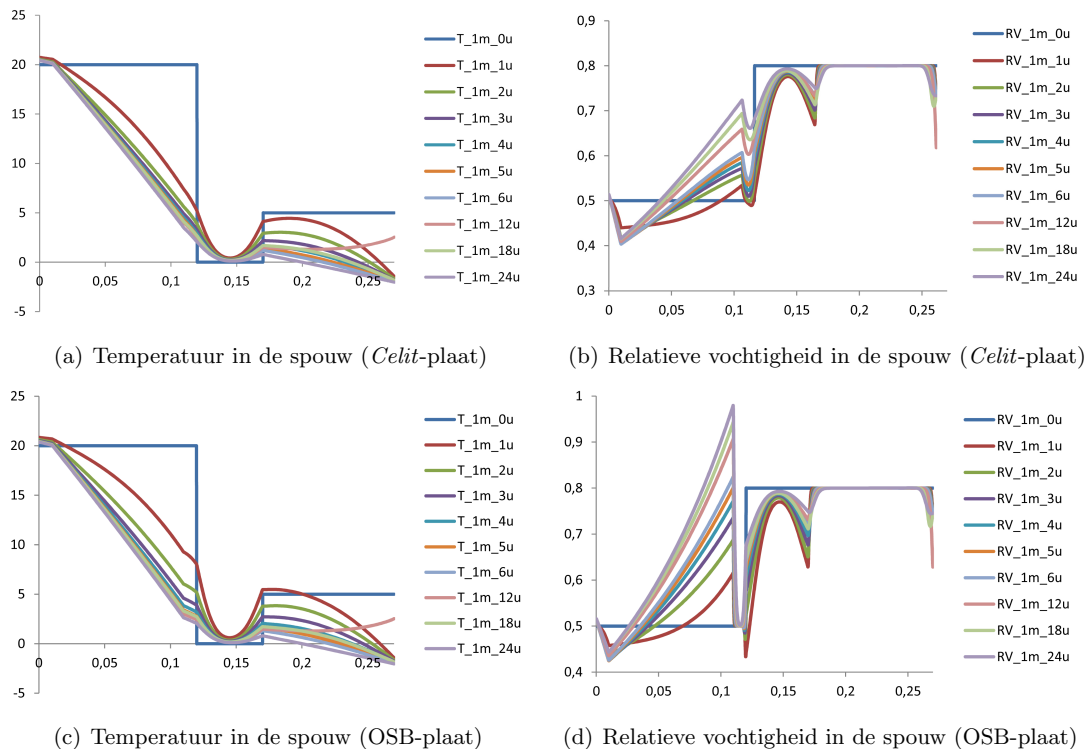
Verticaal vlak ($s=90^\circ$), west ($a_s=90^\circ$)												
uur ↓	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
4.0	0	0	0	0	0	11	4	0	0	0	0	0
5.0	0	0	0	2	26	32	28	13	0	0	0	0
6.0	0	0	0	29	41	44	42	35	20	0	0	0
7.0	0	0	27	43	50	52	50	46	38	24	0	0
8.0	6	25	40	51	56	58	57	53	47	38	23	7
9.0	26	38	49	57	62	63	62	59	54	47	36	26
10.0	37	47	56	65	69	70	69	67	63	56	45	37
11.0	47	56	67	76	81	82	80	77	74	67	55	46
12.0	75	77	106	148	162	145	130	134	157	169	141	98
13.0	100	244	297	349	362	336	323	334	347	335	265	201
14.0	266	370	455	514	529	512	500	502	499	445	312	230
15.0	222	397	539	615	631	621	613	610	579	440	231	147
16.0	0	274	485	623	661	661	657	641	535	274	0	0
17.0	0	0	262	476	583	616	614	550	321	0	0	0
18.0	0	0	0	198	368	453	447	315	0	0	0	0
19.0	0	0	0	0	109	211	200	57	0	0	0	0

Figuur 8.5: Maximale zonnestraling bij helder weer (diffuus en direct, $[W/m^2]$) op een verticale westgevel (december) (Hens (1997)).

De overgangscoefficienten binnen en buiten zijn:

	α	β
Binnen	8	$\alpha \cdot 7 \cdot 10^{-9}$
Buiten	23	$\alpha \cdot 7 \cdot 10^{-9}$

Resultaten



Figuur 8.6: Temperatuurprofiel [°C] en profiel van de relatieve vochtigheid [%] over de breedte van de spouwmuur [m] op 1 m hoogte bij de toepassing van een *Celit*-plaat en een OSB-plaat tijdens een wintersituatie.

In de isolatielaag krijgt men bij de OSB-plaat een sterkere stijging van de relatieve vochtigheid op de grens tussen de isolatie en de OSB-plaat. Dit komt enerzijds door de initieel lagere temperatuur en anderzijds door het moeilijker kunnen transporteren van vocht door middel van diffusie door de OSB-plaat weg uit het binnenspouwblad. Dit resulteert niet onmiddellijk in de ontwikkeling van schimmelmicrobiële groei, aangezien dit ook afhankelijk is van andere factoren zoals omgevingstemperatuur, blootstellingstijd, het soort materiaal en de oppervlakte eigenschappen ervan. Het is met andere woorden niet enkel een hoge relatieve vochtigheid die schimmelmicrobiële groei veroorzaakt (Viitanen & Vinha (2008) en Vereecken & Roels (2012)).

8.1.3 Inzichten

Voor de relatieve vochtigheid in de isolatie is er een verschil tussen een constructie afgewerkt met een *Celit*-plaat tegenover een OSB-plaat. Bij toepassing van een *Celit*-plaat is het effect van een temperatuursdaling op de relatieve vochtigheid veel kleiner doordat een deel van

het vocht weg kan diffunderen uit de isolatie via de *Celit*-plaat naar de luchtsponw. Dus door gebruik te maken van een *Celit*-plaat kan vocht makkelijker uitgewisseld worden met de sponw waardoor lokale pieken en dalen in de relatieve vochtigheid als gevolg van temperatuurverschillen afgezwakt worden. Hierdoor is de kans op inwendige condensatie kleiner dan bij toepassing van een OSB-plaat. In de zomer ontstaat er wel een lokale hogere relatieve vochtigheid aan het sponwoppervlak bij een *Celit*-plaat tegenover een OSB-plaat, maar aangezien de relatieve vochtigheid buiten beperkt blijft, is de kans op schimmelgroei veel kleiner. In ons klimaat is de wintersituatie de kritieke situatie.

Als men daarbij de *Celit*-plaat beoordeelt op vlak van warmtetransport over de sponw dan zorgt deze voor minder warmteverliezen in de winter en minder warmtewinsten in de zomer als gevolg van de lage λ -waarde van de *Celit*-plaat.

8.2 *Celit*-plaat VS. OSB-plaat: aangepaste weeksimulatie

Naast het gebruik van het gekoppeld CFD/HAM-model om bepaalde trends af te leiden zoals eerder in dit eindwerk werd gedaan, is het ook mogelijk simulaties over langere periodes uit te rekenen met variabele randcondities. Door de lange rekentijd en de beperkte rekenkracht van de huidige generatie computers blijft de lengte van de simulatie periode toch nog altijd beperkt. In dit onderdeel wordt er gerekend gedurende een week tijdens de winterperiode, aangezien het risico op schimmelgroei dan het grootst is. Aangezien het gekoppeld CFD/HAM-model enkel damptransport simuleert blijft de relatieve vochtigheid in de sponwmuur onder de 100%.

8.2.1 Randcondities

In eerdere simulaties werden randcondities, zoals de temperatuur of de relatieve vochtigheid, als constant verondersteld. Enkel de invallende zonnestraling en de onderkoeling naar de hemelkoepel varieerden in de tijd. In deze case veranderen alle randcondities per tijdsstap om de werkelijkheid zo goed mogelijk te benaderen.

De initiële condities in de sponw zijn dezelfde als in de vorige case (winter). Voor de variabele randcondities gedurende de week wordt verwezen naar (bijlage D). De waarden van de temperatuur en de relatieve vochtigheid van de buitenlucht en dus ook de inblaaslucht komen overeen met deze van de laatste week van het jaar in Brussel (IWECE). Aan de hand van tekstbestanden worden deze randcondities dan opgelegd voor de inblaascondities en voor de randcondities buiten.

Om bruske verandering van de randcondities per uur te vermijden wordt er constant lineair geïnterpoleerd. Door numeriek te interpoleren zorgt men er voor dat de veranderingen per tijdsstap kleiner zijn, waardoor het numeriek stabiel is te rekenen. Dit komt doordat bij

grote veranderingen van de randcondities men verder van de oplossing zit, waardoor er langer moet gerekend worden om terug te convergeren. Bij het niet interpoleren wordt er gedurende de tijdsspanne van één uur sneller gerekend, aangezien de randcondities dan constant blijven, maar zal na één uur de sprong in de randcondities groter zijn. Hierdoor wordt er geopteerd om te interpoleren, aangezien in werkelijkheid de overgangen ook geleidelijk zijn en niet bruusk.

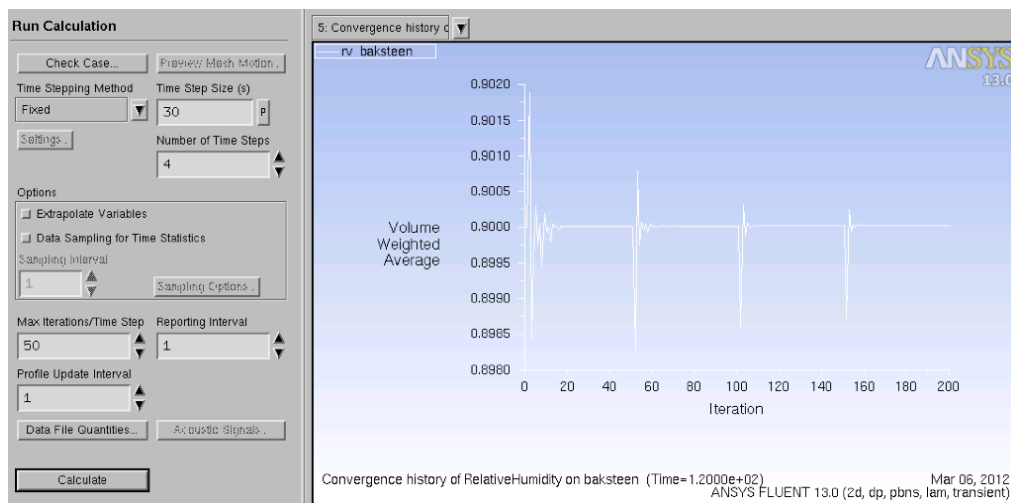
Het effect van regeninval wordt niet bekeken aangezien er zoals eerder vermeld enkel damptransport gesimuleerd wordt met het huidige gekoppeld CFD/HAM-model.

8.2.2 Rekentijd beperken

Om de rekentijd binnen de perken te houden moeten er enkele vereenvoudigingen worden ingevoerd in het gekoppeld CFD/HAM-model. Om echt exact te rekenen moet de griddensiteit oneindig groot zijn en de grootte van de tijdstappen oneindig klein. Aangezien dat numeriek onhaalbaar is, kan er een relatieve fout op de griddensiteit in rekening gebracht worden aan de hand van de *Richardson extrapolatie*. Aangezien er hier nog steeds met hetzelfde model gewerkt wordt als in voorgaande hoofdstukken, is de fout nog altijd kleiner dan 1%, zowel voor de snelheid als de temperatuur als de relatieve vochtigheid.

Voor de tijdafhankelijkheid worden verschillende parameters onderzocht. De grootte van de tijdstap en het aantal iteraties per tijdstap wordt bepaald. Aangezien het de bedoeling is een week te simuleren, moet de rekentijd binnen de perken gehouden worden zonder al te veel aan nauwkeurigheid te moeten inleveren.

Aangezien er bij een tijdstap gelijk aan 60 s zich fysisch niet correcte fenomenen voordoen aan de hoeken van de materialen, onafhankelijk van het aantal iteraties, wordt er geopteerd om te werken met een tijdstap van 30 s. De keuze van deze kleine tijdstap komt tevens doordat bij een inlaatsnelheid van 0,2 m/s bij een spouwhoogte van 2,5 m de spouw ongeveer 5 keer ververst wordt. Dus om de luchtstroming correcter te kunnen uitrekenen is zo'n kleine tijdstap wel aan te raden. Bij een tijdstap van 30 s zijn 15 iteraties per tijdstap voldoende aangezien de temperatuur en de relatieve vochtigheid dan genoeg iteraties hebben ondergaan om geconvergeerd te zijn (figuur 8.7).



Figuur 8.7: Aantal iteraties per tijdsstap van 30 s vooraleer de relatieve vochtigheid convergeert (*Fluent*).

Zo komt men tot 30 iteraties per minuut aan een gemiddelde van 2 s per iteratie, wat dus neerkomt op een week simuleren. De rekentijd komt dan ongeveer overeen met de simulatietijd, wat aanvaardbaar is, waardoor men van een *real time* simulatie kan spreken.

8.2.3 Resultaten

Voor de temperatuur en relatieve vochtigheid in de spouw op 1 m hoogte wordt verwezen naar (bijlage C). Uit deze simulaties komen dezelfde resultaten zoals uit de eerdere dag simulaties: een hogere relatieve vochtigheid in de isolatie bij toepassing van een OSB-plaat tegenover een *Celit*-plaat.

Voor de temperatuursprofiel bij randcondities zoals ze in de werkelijkheid voorkomen is al snel duidelijk dat de temperaturen aan beide spouwoppervlakken quasi gelijk zijn, wat dus nog eens wijst op een goede aanname in *WUFI-2D* dat de lokale warmte- en massaovergangscoefficienten aan beide spouwoppervlakken zo goed als gelijk zijn.

8.3 *Celit*-plaat VS. OSB-plaat: jaarsimulatie in *WUFI-2D*

In *WUFI-2D* wordt een identieke simulatie gedaan over een periode van 1 jaar voor het klimaat in Brussel. Om de twee cases te kunnen vergelijken wordt de temperatuur en relatieve vochtigheid in de isolatie ter hoogte van grens tussen de isolatie en de *Celit*-plaat of OSB-plaat beoogd.

8.3.1 Randcondities

Voor de initiële condities in de spouw worden dezelfde waarden genomen als in de vorige case (winter):

	Binnenspouwblad	Luchtsouw	Buitenspouwblad
Temperatuur	20	0	5
Relatieve vochtigheid	50	80	80

Tabel 8.1: Initiële condities voor de wintersituatie.

De temperatuur en relatieve vochtigheid binnen zijn respectievelijk gelijk aan 21°C en 50%.

		α	β
De overgangscoefficienten binnen en buiten zijn:	Binnen	8	$\alpha \cdot 7 \cdot 10^{-9}$
	Buiten	23	$\alpha \cdot 7 \cdot 10^{-9}$

De randcondities buiten worden bepaald het weerbestand van Brussel (straling, relatieve vochtigheid en temperatuur). Het ventilatievoud komt overeen met een ventilatievoud bij 0,2 m/s: 288 1/h, gelinkt aan de buitencondities.

8.3.2 Resultaten

Celit-plaat of OSB-plaat?

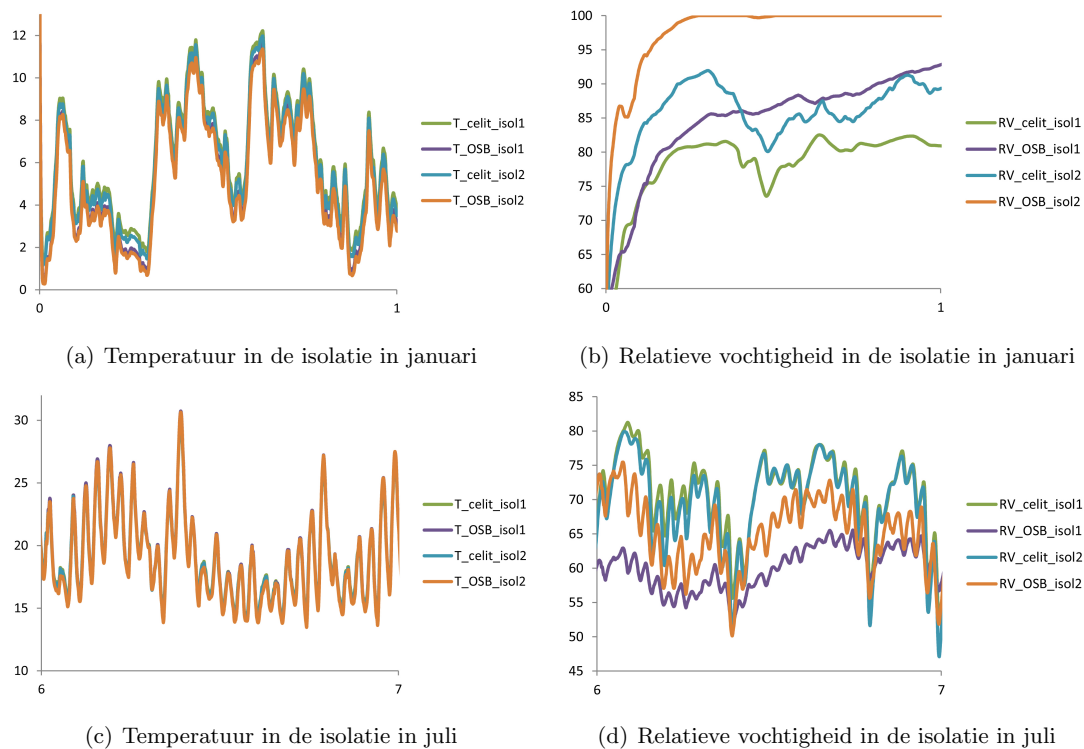
Voor een jaarsimulatie in het klimaat van Brussel komen dezelfde fenomenen terug zoals eerder voorspeld in het gekoppeld CFD/HAM-model: lagere relatieve vochtigheid in de isolatie in de zomer bij het toepassen van een OSB-plaat, maar veel grotere in de winter. Aangezien de zomer niet kritisch is voor het risico op schimmelgroei, maar wel de winter ($\varphi > 80\%$) is het toepassen van een OSB-plaat als afwerking van de isolatie een slechte ingreep in ons klimaat.

In de winter zijn de temperaturen in de isolatie ter hoogte van de grens tussen de isolatie en de *Celit*-plaat hoger dan bij het toepassen van een OSB-plaat. Dit komt door de kleinere λ -waarde van de *Celit*-plaat waardoor het transport van koude naar binnen beter wordt tegengehouden. In de zomer is het verschil in temperatuur beperkter als gevolg van de kleine warmtefluxen doorheen het binnenspouwblad aangezien zowel binnen als buiten de temperatuur quasi gelijk is (21°C).

Het voordeel van *WUFI-2D* is hier dat men de duur van een te hoge relatieve vochtigheid ($\varphi > 80\%$) kan voorspellen in tegenstelling tot het gekoppeld CFD/HAM-model die slechts beperkte periodes kan simuleren. Op het zicht is al snel duidelijk dat het toepassen van een

OSB-plaat een slecht idee is om het risico op schimmelgroei te verkleinen. Hierbij wordt er nog niet gesproken van de extra warmteverliezen in de winter en de extra warmtewinsten in de zomer. In ons klimaat blijven de extra warmtewinsten in de zomer en de warmteverliezen in de winter beperkt als gevolg van ons gematigd klimaat. In klimaten waarbij het verschil in temperatuur tussen winter en zomer groter is, zou een *Celit*-plaat wel zorgen voor minder warmtewinsten in de zomer en minder warmteverliezen in de winter.

Samengevat kan men er van uitgaan dat zowel op vlak van het risico op schimmelgroei als op vlak van minder warmteverliezen de *Celit*-plaat beter presteert. In warmere klimaten zou de *Celit*-plaat nog beter functioneren, omdat deze in de zomer dan ook voor minder warmtewinsten zorgt.



Figuur 8.8: Temperatuur [°C] en relatieve vochtigheid [%] in de isolatie vlakbij een *Celit*-plaat of een OSB-plaat in januari en juli. (isol1=minerale isolatie plaat (compact), isol2=minerale wol)

Isolatie

Indien men in plaats van een mineraal isolatie plaat (isol1) (μ -waarde =3,4) zoals in de eerdere *WUFI*-simulatie, minerale wol (isol2) gebruikt met een μ -waarde van 1,3, dan kan

vocht veel makkelijker diffunderen uit de isolatie richting de luchtsponw. Door het diffunderen van damp weg uit de isolatie wordt er opnieuw damp aangetrokken van binnen uit. Bij het gebruik van een OSB-plaat wordt het vocht lokaal aan de overgang tussen de isolatie en de OSB-plaat opgeslagen als gevolg van de hoge μ -waarde van de OSB-plaat.

Om het damptransport van binnen naar buiten tegen te gaan wordt het gebruik van een dampscherm aan de binnenzijde aangeraden.

Indien er toch niet met een dampscherm gewerkt wordt is het veiliger een isolatiemateriaal te gebruiken met een grotere diffusie weerstand in combinatie met een afwerkingsmateriaal met een lage diffusie weerstand om zo mogelijke inwendige condensatie te vermijden.

8.4 Dampscherm: aangepaste dagsimulatie

Om de invloed van een dampscherm te bekijken op de relatieve vochtigheid in de isolatie wordt er een simulatie gedaan bij enerzijds de toepassing van de *Celit*-plaat als anderzijds de OSB-plaat als isolatie bescherming.

8.4.1 Randcondities

Om deze simulatie uit te voeren zonder het *Gambit*-model te moeten aanpassen wordt het voorstel gedaan te werken met de μd -waarde. Zo kan de gipskarton-plaat van 10 mm dik dezelfde vochtweerstand hebben als een dampscherm van 1mm. Bij een μd -waarde van 100 is de μ -waarde gelijk aan 100000 bij 1 mm en 10000 bij 10 mm.

Bij het verhogen van de μ -waarde van de binnenaferking ontstaat er een numerieke probleem in de *Fluent-solver*. Dit komt doordat er een te groot verschil is in μ -waarde tussen twee opeenvolgende cellen, waardoor de matrix moeilijker op te lossen is door de *Fluent-solver* (Pankar (1980)). Om in deze simulatie in het gekoppeld CFD/HAM-model een dampscherm te simuleren wordt de vochtflux van binnen naar de spouw gelijk gesteld aan nul ($g = 0$), wat dus overeenkomt met een ideaal dampscherm.

Voor de initiële condities in de spouw worden dezelfde waarden genomen als in de vorige case (winter):

	Binnenspouwblad	Luchtsponw	Buitenspouwblad
Temperatuur	20	0	5
Relatieve vochtigheid	50	80	80

Tabel 8.2: Initiële condities voor de wintersituatie.

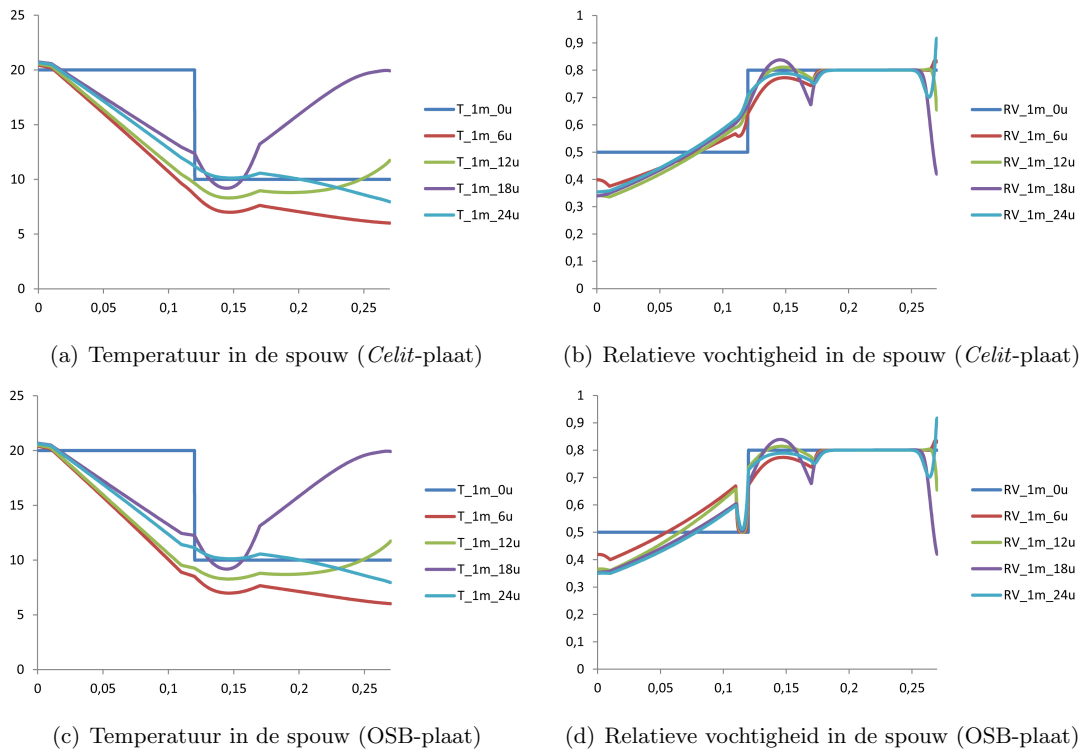
De temperatuur en relatieve vochtigheid binnen zijn respectievelijk gelijk aan 21°C en 50%.

De overgangscoefficienten binnen en buiten zijn:

	α	β
Binnen	8	$\alpha \cdot 7 \cdot 10^{-9}$
Buiten	23	$\alpha \cdot 7 \cdot 10^{-9}$

De randcondities komen overeen met de eerste 24 u van de weeksimulatie (bijlage D).

8.4.2 Resultaten



Figuur 8.9: Temperatuurprofiel [°C] en profiel van de relatieve vochtigheid [%] in de spouwmuur op 1 m hoogte bij de toepassing van een Celit-plaat en een OSB-plaat met een dampscherm tijdens een wintersituatie.

Bij vergelijking van deze resultaten met deze uit (bijlage C) valt onmiddellijk op dat de relatieve vochtigheid in het binnenspouwblad lager is. Dit komt doordat er een daling is van de relatieve vochtigheid aan het binnenoppervlak door de temperatuurstijging. Als gevolg van het dampscherm is de vochtflux gelijk aan nul en kan de relatieve vochtigheid daar lokaal zakken onder de 50%, zonder dat er extra waterdamp wordt aangevoerd van binnenuit. In klimaten met een warmer en vochtiger buitenklimaat zullen er zich dan omgekeerde fenomenen voordoen en is het beter een dampscherm aan de buitenzijde van het binnenspouwblad te voorzien in plaats van aan de binnenzijde zoals in ons klimaat gedaan wordt.

Na verloop van tijd stijgt bij de *Celit*-plaat de relatieve vochtigheid in de isolatie door de aanvoer van vochtige lucht van de luchtpouw naar het binnenspouwblad. Bij de OSB-plaat daarentegen daalt deze na verloop van tijd doordat de temperatuur in de isolatie weer stijgt en het vochtgehalte constant blijft door de grote μ -waarde van de OSB-plaat, die ervoor zorgt dat de vochtflux naar buiten belemmerd wordt.

8.5 Besluit

Door gebruik te maken van variabele randcondities per tijdsstap in het gekoppeld CFD/HAM-model, is het mogelijk simulaties te doen die overeenkomen met de werkelijkheid. Om dit te illustreren werden enkele cases onderzocht met de bijhorende resultaten:

Bij de vergelijking tussen een *Celit*-plaat en een OSB-plaat als afwerkingsmateriaal van de isolatie is een *Celit*-plaat beter om inwendige condensatie in de winter te vermijden in ons klimaat. Door de lage μ -waarde van een *Celit*-plaat kan bij snelle temperatuursdalingen, waardoor de relatieve vochtigheid stijgt, vocht sneller naar buiten verwijderd worden, waardoor de stijging van de relatieve vochtigheid in de isolatie beperkt blijft. Bij een OSB-plaat daarentegen wordt het vocht opgeslagen in de isolatie door de hoge vochtweerstand van de OSB-plaat.

Door de lage λ -waarde van de *Celit*-plaat zorgt deze er ook voor dat de warmteverliezen in de winter en de warmtewinsten in de zomer beperkt blijven.

De toepassing van een dampscherm aan de binnenzijde beperkt de kans op schimmelvorming, doordat het damptransport van binnen naar buiten belemmerd wordt. De enigste fenomenen die dan nog voor een stijging van de relatieve vochtigheid van het binnenspouwblad kunnen zorgen zijn:

- Een extreme temperatuursdaling.
- Vochtige ventilatielucht.
- Een extreem nat buitenspouwblad ($\varphi = 100\%$).

Samengevat kan worden aangenomen dat de *Celit*-plaat in ons klimaat betere resultaten geeft op vlak van warmte- en vochttransport in het algemeen. In een ander klimaat daarentegen kunnen de resultaten dan weer verschillen. Dit illustreert weer de noodzaak naar en de kracht van simulatieprogramma's.

Hoofdstuk 9

Inzichten en besluiten

9.1 Grenslagen

Als gevolg van een stroming over een verticale plaat ontwikkelt er zich een grenslaag waarbij de dikte bepaald wordt door de lokale snelheid. Deze lokale snelheid wordt voornamelijk bepaald door enerzijds de inblaassnelheid en anderzijds de lokale oppervlakte temperatuur aan het spouwoppervlak. De dikte van deze grenslaag bepaalt het gemak om convectief warmte en vocht uit te wisselen aan het spouwoppervlak.

Bij twee evenwijdige platen geldt de warmte/massa-analogie enkel wanneer het aandeel gedwongen convectie groter is dan het aandeel natuurlijke convectie. Hoger in de spouw kan er zich een afwijking voordoen mogelijk als gevolg van het nog ontwikkelende snelheidsprofiel en doordat de referentie temperatuur of massafractie niet lokaal bepaald wordt, maar constant genomen wordt (inlaat waarde) om de overgangscoefficienten te bepalen. Het is dus belangrijk te beseffen dat het toepassen van een constante warmte/massa-analogie in een luchtspouw niet altijd van toepassing is.

In de winter is de kans op condensatie groter door de lagere temperaturen waardoor de relatieve vochtigheid stijgt. Doordat men daarbij in de winter quasi enkel warmteverliezen heeft, zullen deze onderaan de spouw groter zijn dan bovenaan door de grotere overgangscoefficiënt. In de zomer daarentegen worden de warmteverliezen van 's nachts gecompenseerd door de warmtewinsten overdag. Dit heeft tot gevolg dat een opgedeelde overgangscoefficiënt over de hoogte van de spouw een grote impact heeft in de winter, maar slechts een kleine impact in de zomer. Afhankelijk van klimaat tot klimaat zal deze impact dus verschillen.

9.2 Straling

Om een niet geventileerde spouw te simuleren in *WUFI-2D* wordt gebruik gemaakt van een λ_{eff} - en een μ_{eff} -waarde in de luchtlaag om een luchtspouw te simuleren. Deze waarde wordt

opgemeten bij enkel natuurlijke convectie. Om een geventileerde luchtspouw te simuleren wordt hierbij een warmte- en/of vochtbron toegevoegd waarbij de grootte afhankelijk is van het ventilatiedebiet.

Deze modellering in *WUFI-2D* baseert zich op het volgende fenomeen: door de warmteuitwisseling tussen beide spouwoppervlakken als een gevolg van de langegolfstraling in de spouw komen de temperaturen aan beide spouwoppervlakken sneller tot een gelijke temperatuur. Aangezien naast de inblaassnelheid (gedwongen convectie) de lokale temperatuur (natuurlijke convectie) sterk de lokale snelheid bepaalt is de lokale gemiddelde overgangscoefficiënt aan beide spouwoppervlakken gelijk. Hierdoor is het een goede benadering dat er in *WUFI-2D* gewerkt wordt met een λ_{eff} - en een μ_{eff} -waarde voor de warmte- en vochtoverdracht in spouwvlucht.

Bij een simulatie van een identieke case in het gekoppeld CFD/HAM-model en *WUFI-2D* worden bij gelijke temperaturen aan beide spouwoppervlakken gelijkaardige resultaten bekomen (gelijke helling van de curve van de toename van de temperatuur en de relatieve vochtigheid). Bij initiële temperatuurverschillen daarentegen is er een afwijking van de relatieve vochtigheid van enkele procenten. Dit wijst dus op een goede vorm van modelleren van een geventileerde spouw in *WUFI-2D* als het temperatuurverschil tussen beide spouwbladen beperkt blijft. Fysisch gezien is het model niet correct maar voldoet wel als een goede benadering.

In *WUFI-2D* worden de λ_{eff} -waarden en μ_{eff} -waarden bepaald om de invloed van de spouwbladen onderling ook in rekening te brengen. Het is hierin dat er enkele fysische onjuistheden zitten. Een eerste fout zijn de verschillende λ_{eff} -waarden en μ_{eff} -waarden bij verschillende spouwbreedtes. Een tweede fout is dat de λ_{eff} -waarden en μ_{eff} -waarden bepaald worden bij natuurlijke convectie en niet bij gedwongen convectie. Een derde benadering in *WUFI-2D* is dat de λ_{eff} -waarden en μ_{eff} -waarden constant worden verondersteld over de breedte van de luchtspouw. Fysisch gezien variëren deze over de breedte van de luchtspouw, als gevolg van het snelheidsprofiel dat niet symmetrisch is. Maar het zijn vooral de λ -waarde en μ -waarde van het materiaal die bepalend zijn voor de hoeveel warmte- en vochtuitwisseling aan het oppervlak. Hierdoor blijven deze fouten voor de warmte- en vochtuitwisseling aan het oppervlak beperkt.

Validatie met metingen daarentegen vertonen goede resultaten (Karagiozis & Kuenzel (2009) en Straube & Finch (2009)). Dit is te verklaren doordat men in de werkelijkheid slechts kleine temperatuurverschillen ervaart tussen de spouwoppervlakken. Indien er toch temperatuurverschillen tussen de spouwoppervlakken zijn, dan zal de temperatuur en de relatieve vochtigheid bij een wissel van richting van de warmte- en/of vochtflux bij bijvoorbeeld de wissel tussen dag en nacht gecompenseerd worden, doordat er telkens een onderschatting of een overschatting van de fluxen aan de spouwoppervlakken plaats vindt.

9.3 Onderlinge invloed tussen spouwbladen

In de onderzochte spouwconfiguratie met een spouwbreedte van 5 cm en de opgegeven randcondities voor de temperatuur en relatieve vochtigheid is er duidelijk een initiële invloed van het buitenspouwoppervlak op het binnenspouwblad waar te nemen. Initieel is de invloed op het binnenspouwblad groot, maar na verloop van tijd verkleint de invloed doordat het metselwerk aan het spouwoppervlak uitdroogt. Bij hogere inblaassnelheden is de grenslaag nog dunner, waardoor de spouwoppervlakken nog sneller uitdrogen.

Na verloop van tijd is de relatieve vochtigheid in de luchtspouw ongeveer gelijk aan de inblaascondities, doordat de oppervlakcondities na uitdroging ook quasi gelijk zijn aan de temperatuur en relatieve vochtigheid van de inblaascondities. Indien men de relatieve vochtigheid in het metselwerk constant houdt op 80%, dan is de invloed op de *Celit*-plaat groter, doordat het metselwerk dan niet uitdroogt en de relatieve vochtigheid in de luchtspouw hoger blijft. Deze situatie komt dan bijvoorbeeld overeen met een materiaal dat minder snel uitdroogt.

Bij hoge relatieve vochtigheden ($\pm 100\%$) van het buitenspouwblad is de kans groot dat de invloed van de relatieve vochtigheid van het buitenspouwblad op het binnenspouwblad niet te verwaarlozen is door het grote verschil in relatieve vochtigheid. Als gevolg van de materiaalkenmerken zal de invloed veranderen. De materiaalkenmerken die dit bepalen zijn:

- De vochtdoorlatendheid K .
- De karakteristieke sorptie-isotherm
- Het (saturatie) vochtgehalte ($w_{(sat)}$).

Hetzelfde geldt voor de temperatuur: hoe groter de λ -waarde hoe makkelijker de warmte wordt toegevoerd uit het materiaal naar het oppervlak van het materiaal waar het uitdroogt. Dit in combinatie met de warmtecapaciteit van het materiaal bepaalt de grootte van de invloed. Zo zal een materiaal met een grote warmtecapaciteit meer warmte moeten ontvangen of afgeven om een temperatuursverandering te ondergaan.

Al deze eigenschappen verschillen van materiaal tot materiaal. Dit bewijst onmiddellijk het praktische nut van bestaande simulatie modellen om hun gedrag te voorspellen.

Het is vooral in de wintersituatie dat er een invloed van het buitenspouwblad op het binnenspouwblad is bij een geventileerde luchtspouw. Dit komt doordat in de zomer het buiten- en binnenspouwblad uitdrogen aan het spouwoppervlak, waardoor de invloed verkleint. Hierdoor is het vooral de relatieve vochtigheid van de ventilerende buitenlucht die de relatieve vochtigheid in de *Celit*-plaat bepaalt.

Als het buitenspouwblad niet uit metselwerk wordt opgebouwd, maar uit beton, dat langer een hoge relatieve vochtigheid aanhoudt, wordt er een grotere invloed van het buitenspouwblad op het binnenspouwblad verwacht, maar door de grote droging van het buitenspouwblad wordt tevens de relatieve vochtigheid van de ventilerende buitenlucht beter benadert.

Indien de luchtsouw niet geventileerd wordt, dan is de droging van het binnen- en het buitenspouwblad kleiner. Hierdoor drogen het beton en het metselwerk minder snel waardoor er langer een hoger relatieve vochtigheid wordt aangehouden in de zomersituatie. In ons klimaat is de toepassing van een geventileerde spouw dus beter om condensatie te vermijden, maar in een ander klimaat (vochtig en warm) kan dit daarentegen nadelig zijn. Deze resultaten zijn dus sterk klimaat afhankelijk en moeten situatie per situatie apart bekeken en dus gesimuleerd worden.

9.4 Toepassingen

Door gebruik te maken van variabele randcondities per tijdsstap in het gekoppeld CFD/HAM-model, is het mogelijk simulaties te doen die overeenkomen met de werkelijkheid. Om dit te illustreren werden enkele cases onderzocht met de bijhorende resultaten:

Bij de vergelijking tussen een *Celit*-plaat en een OSB-plaat als afwerkingsmateriaal van de isolatie is een *Celit*-plaat beter om inwendige condensatie in de winter te vermijden in ons klimaat. Door de lage μ -waarde van een *Celit*-plaat kan bij snelle temperatuursdalingen, waardoor de relatieve vochtigheid stijgt, vocht sneller naar buiten verwijderd worden, waardoor de stijging van de relatieve vochtigheid in de isolatie beperkt blijft. Bij een OSB-plaat daarentegen wordt het vocht opgeslagen in de isolatie door de hoge vochtweerstand van de OSB-plaat.

Door de lage λ -waarde van de *Celit*-plaat zorgt deze er ook voor dat de warmteverliezen in de winter en de warmtewinsten in de zomer beperkt blijven.

De toepassing van een dampscherm aan de binnenzijde beperkt de kans op schimmelvorming, doordat het damptransport van binnen naar buiten belemmerd wordt. De enigste fenomenen die dan nog voor een stijging van de relatieve vochtigheid van het binnenspouwblad kunnen zorgen zijn:

- Een extreme temperatuursdaling.
- Vochtige ventilatielucht.
- Een extreem nat buitenspouwblad ($\varphi = 100\%$).

Samengevat kan worden aangenomen dat de *Celit*-plaat in ons klimaat betere resultaten geeft op vlak van warmte- en vochttransport in het algemeen. In een ander klimaat daarentegen kunnen de resultaten dan weer verschillen. Dit illustreert weer de noodzaak naar en de kracht van simulatieprogramma's.

9.5 Conclusies

Het is niet exact om met *WUFI-2D* een geventileerde spouw te simuleren, maar het model geeft wel een goede benadering van de werkelijkheid. Om de volledige complexiteit in een geventileerde spouw te willen simuleren is er nood aan een gekoppeld CFD/HAM-model dat zowel damptransport als vloeibaar vochttransport simuleert (Bellegheem (2012)). Op deze manier is het mogelijk om net zoals in het gekoppeld CFD/HAM-model dat damptransport simuleert dezelfde fenomenen te onderzoeken, maar inclusief met vloeibaar vochttransport.

Naast de onnauwkeurigheid in het model om een geventileerde spouw te simuleren in *WUFI-2D* is er ook nog de vochtgevoeligheid van bepaalde materiaalkenmerken zoals bijvoorbeeld de λ -waarde waarop er nog een grote onzekerheid zit. Bij één identiek materiaal wordt er bijvoorbeeld bij verschillende metingen verschillende resultaten bekomen (Bellegheem (2011)). Dus in principe is *WUFI-2D* voldoende om een beeld te krijgen van de invloed van een geventileerde spouw om het risico op schimmelgroei te voorspellen, maar om meer inzicht te krijgen in de fysische fenomenen die zich bij een verandering van de randcondities voordoen is er een nood aan een exact CFD/HAM-model dat zowel luchtstromingen als damp- als vloeibaar vochttransport meesimuleert (Bellegheem (2012)).

Bij een simulatie in het gekoppeld CFD/HAM-model die enkel damptransport simuleert is het met de huidige rekenkracht van de computers al mogelijk om de rekentijd gelijk te nemen aan de te simuleren rekentijd. Bij de combinatie van parallel rekenen en krachtigere processors bestaat er hierbij een mogelijkheid om de rekentijd te beperken en zo via een gekoppeld CFD/HAM-model die zowel damptransport als vloeibaar vochttransport simuleert een exacte simulatie te maken voor een langere periode, aangezien we bij vochtproblemen altijd geïnteresseerd zijn in de opeenvolging van periodes van bevochtiging en droging. Dit leidt tot een exacte manier van simuleren, waardoor dure en tijdrovende proeven omzeild kunnen worden.

Bijlage A

Afleiding van de warmte/massa-analogie

In de warmte en massa analogie wordt gebruik gemaakt van enkele dimensieloze getallen, zoals het Prandtl-getal:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha_D} \quad (\text{A.1})$$

Met ν de kinematische viscositeit en α_D de thermische diffusiviteit en het Schmidt-getal:

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (\text{A.2})$$

Met D de massa diffusiviteit. Reynolds was de eerste die de analogie tussen warmte- en impuls verklaarde (Steeman (2009)). De Reynolds analogie relateert de warmteovergangscoefficiënt (α) met de oppervlakte wrijvingscoëfficiënt (C_f):

$$St = \frac{\alpha}{\rho v_\infty C} = \frac{C_f}{2} \quad (\text{A.3})$$

Met v_∞ de snelheid van het fluïdum, ρ de dichtheid van het fluïdum en C de warmtecapaciteit. Hierbij is het Prandtl getal (Pr) gelijk aan één. De Reynolds analogie kan ook toegepast worden bij massa transport in het geval het Schmidt getal (Sc) gelijk is aan één.

$$St_m = \frac{\beta_\rho}{v_\infty} = \frac{C_f}{2} \quad (\text{A.4})$$

In het geval dat zowel Pr en Sc gelijk zijn aan één, dan kunnen vorige vergelijkingen gecombineerd worden om zo een relatie te krijgen tussen de massaovergangscoefficiënt en de warmteovergangscoefficiënt:

$$\frac{St}{St_m} = \frac{\alpha}{\rho C \beta_\rho} = \frac{C_f}{2} = 1 \quad (\text{A.5})$$

Deze formule is enkel toepasbaar in een gelimiteerd aantal gevallen. Daarom werd er gezocht naar analogiën die meer algemeen toepasbaar zijn.

Prandtl ontwikkelde een analogie voor massa en impuls transport door de turbulente kern en de laminaire onderlaag te beschouwen. In deze analogie zit het effect van Pr en Sc verschillend van één.

Von Karman vervulde het werk van Prandtl en nam het effect van de overgangslaag tussen de laminaire onderlaag en de turbulente kern in rekening. Dit leidde tot een extra correctieterm als functie van respectievelijk Pr en Sc in de vergelijkingen van St en St_m . De toepassing van de Prandtl en de von Karman analogiën is beperkt tot gevallen met verwaarloosbare luchtweerstand.

Wanneer Prandtl en von Karman de Reynolds analogie aangepast hebben door de transport vergelijkingen te bekijken in de grenslaag, zochten Chilton en Colburn (Chilton & Colburn (1934)) aanpassingen voor de Reynolds analogie door gebruik te maken van experimentele data. Ze suggereerden een simpele aanpassing voor situaties met Pr en Sc verschillend van één. Hiervoor definieerden ze de j -factor voor warmte- en massatransport:

$$j_H = StPr^{\frac{2}{3}} = \frac{C_f}{2} \quad (\text{A.6})$$

$$j_m = St_m Sc^{\frac{2}{3}} = \frac{C_f}{2} \quad (\text{A.7})$$

De complete Chilton-Colburn analogie wordt gevormd door het combineren van de twee vorige vergelijkingen:

$$\frac{St}{St_m} = \frac{\alpha}{\rho C \beta_\rho} = Le^{\frac{2}{3}} \quad (\text{A.8})$$

Om β_Y en β_p te schrijven in functie van β_ρ wordt gebruik gemaakt van de definitie van de ideale gaswet:

$$pV = mRT \quad (\text{A.9})$$

en de definitie van massafractie Y :

$$Y = \frac{\rho_v}{\rho} \quad (\text{A.10})$$

Zo krijgt men:

$$\beta_p = \frac{\beta_\rho}{R_v T} = \frac{\beta_Y}{R_v T \rho} \quad (\text{A.11})$$

De analogie tussen warmte en massa transport wordt uitgedrukt door de ratio van St en St_m . Deze ratio wordt de Lewis factor of Lewis relatie (Lewis (1970)) genoemd en mag niet verward worden met het Lewis-getal. Afhankelijk van het gebruik van de Reynolds analogie of de Chilton-Colburn analogie, zal de Lewis-factor gelijk zijn aan één of $Le^{\frac{2}{3}}$. De analogie tussen warmte en impuls transport en tussen massa en impuls transport is het geval voor gedwongen convection. Voor natuurlijke convection wordt wat van deze analogie afgeweken. Daarom is het aangeraden deze analogie slechts te gebruiken in gevallen die niet zo gevoelig zijn aan kleine variaties van de overgangscoefficiënt (Steeman (2009)).

Bijlage B

Materiaal kenmerken

B.1 Basis kenmerken

	μ	ρ	C	ϕ	λ
Gips	8,5	850	850	0,65	0,2
Minerale wol	1,3	60	850	0,95	0,04
<i>Celit</i>	6	270	1550	0,83	0,046
OSB	134	553	1700	0,61	0,12
Licht metselwerk	16	600	850	0,77	0,12
Licht beton (cellenbeton)	8,3	600	850	0,72	0,14

B.2 Vochtgevoelige λ -waarde

Gips	$0,2+0,0002.(\Theta-10)+0,0019.w$
Minerale wol	$0,04+0,0002.(\Theta-10)+6.10^{-7}.w^2+3.10^{-5}.w$
<i>Celit</i>	$0,046+0,0002.(\Theta-10)+0,0007.w$
OSB	$0,12+0,0002.(\Theta-10)+0,00032623.w$
Licht metselwerk	$0,12+0,0002.(\Theta-10)+0,002.w$
Licht beton (cellenbeton)	$0,14+0,0002.(\Theta-10)+0,0008639.w$

B.3 Sorptie-isotherm

In het gekoppeld CFD/HAM-model worden deze curves volgens (IEA (2000)) beschreven door de functie:

$$w = w_{sat} \left(1 - \frac{\ln(\varphi)}{A} \right)^{-\frac{1}{n}} \quad (\text{B.1})$$

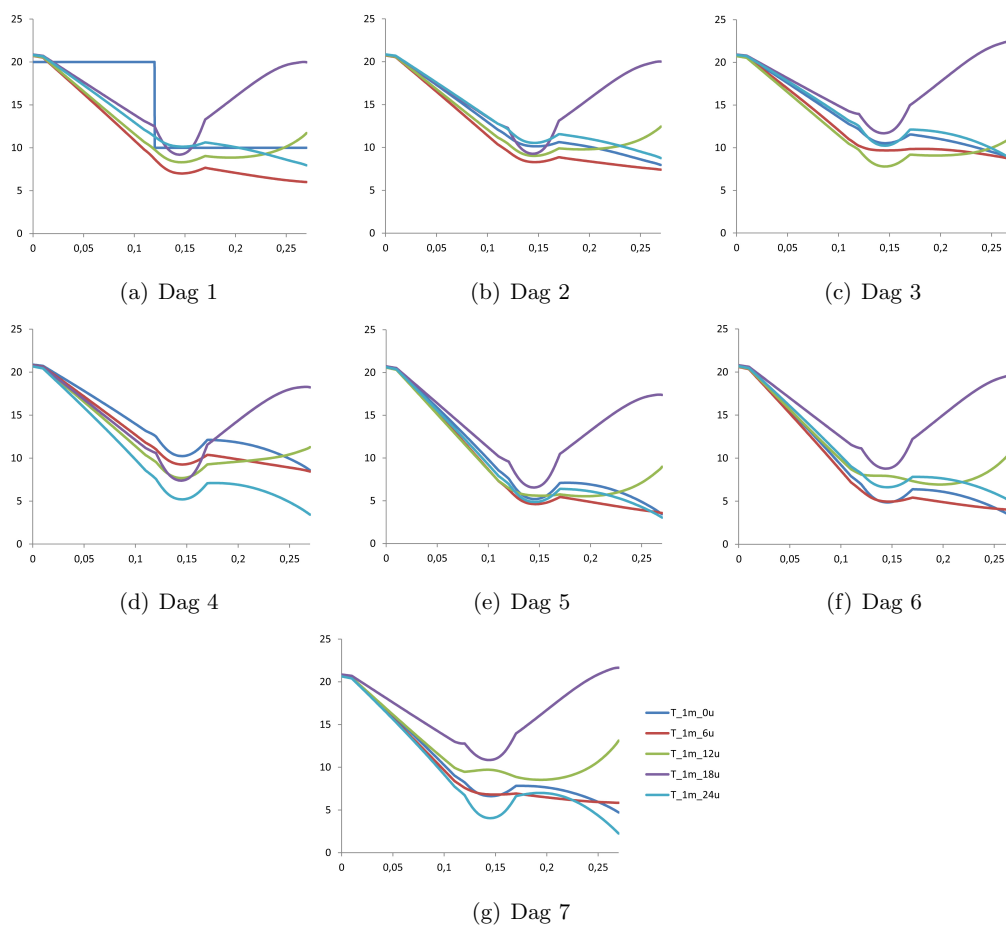
Met w_{sat} , n en A de *fitting*-parameters.

	A	n	w_{sat}
Gips	112,2009247	0,00769046	8,260197933
Minerale wol	0,001162334	1,011144223	875,0272272
<i>Celit</i>	0,27990833	0,520684435	78,8237547
OSB	0,014045843	3,714603151	203,1952666
Licht metselwerk	0,080849838	0,70045466	84,39463956

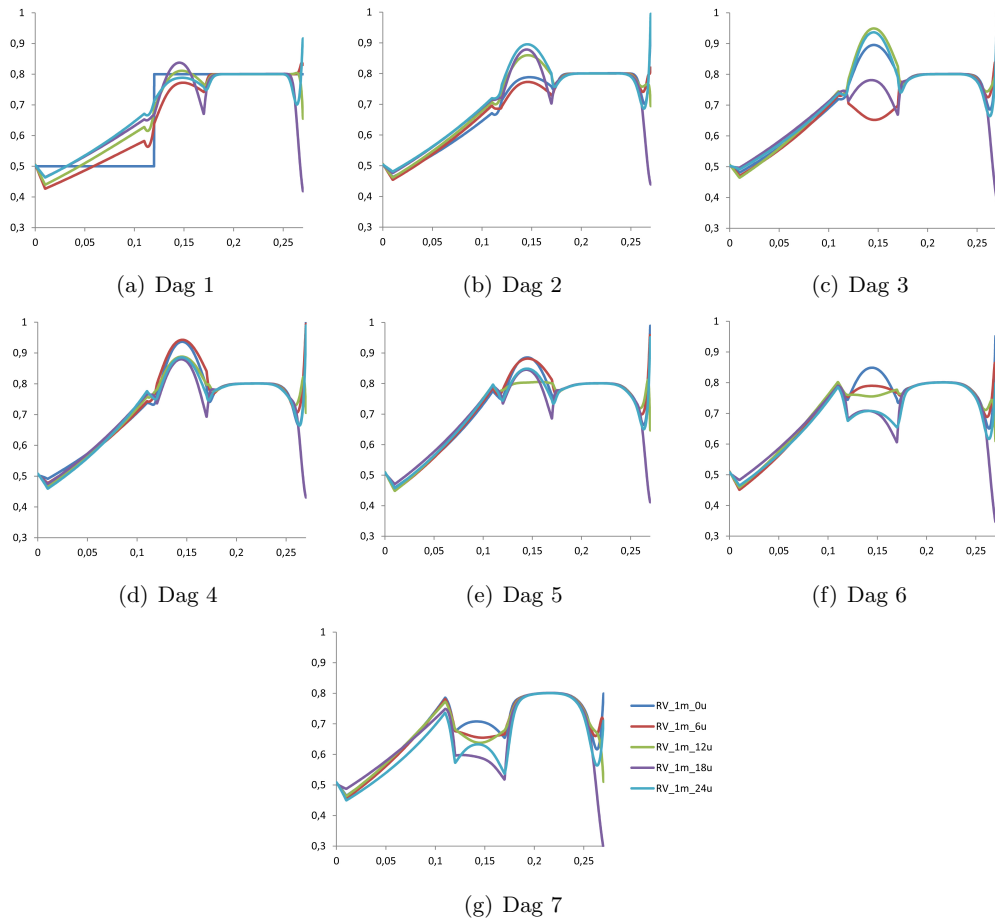
Opmerking: De w_{sat} -waarden komen niet overeen met de werkelijke w_{sat} -waarden. Met de gebruikte w_{sat} -waarden wordt de werkelijke sorptie-isotherm beter benaderd bij een relatieve vochtigheid kleiner dan 90%.

Bijlage C

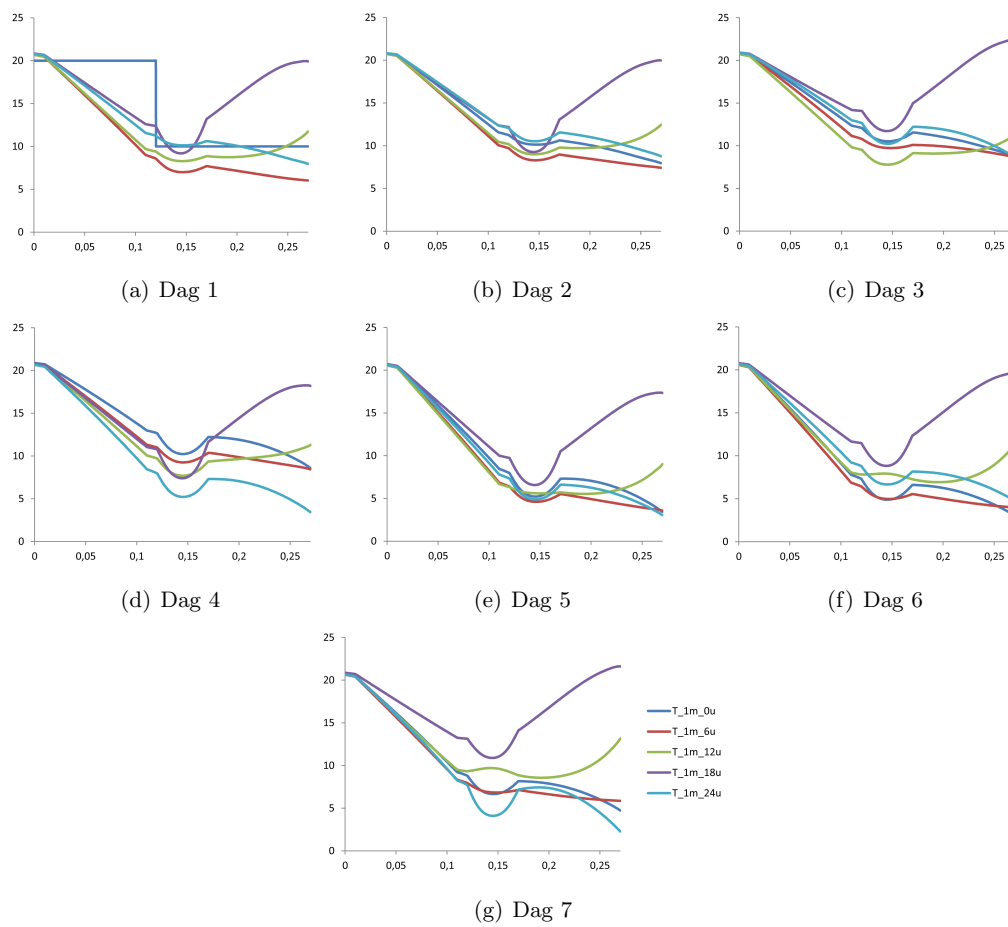
Weeksimulaties: resultaten



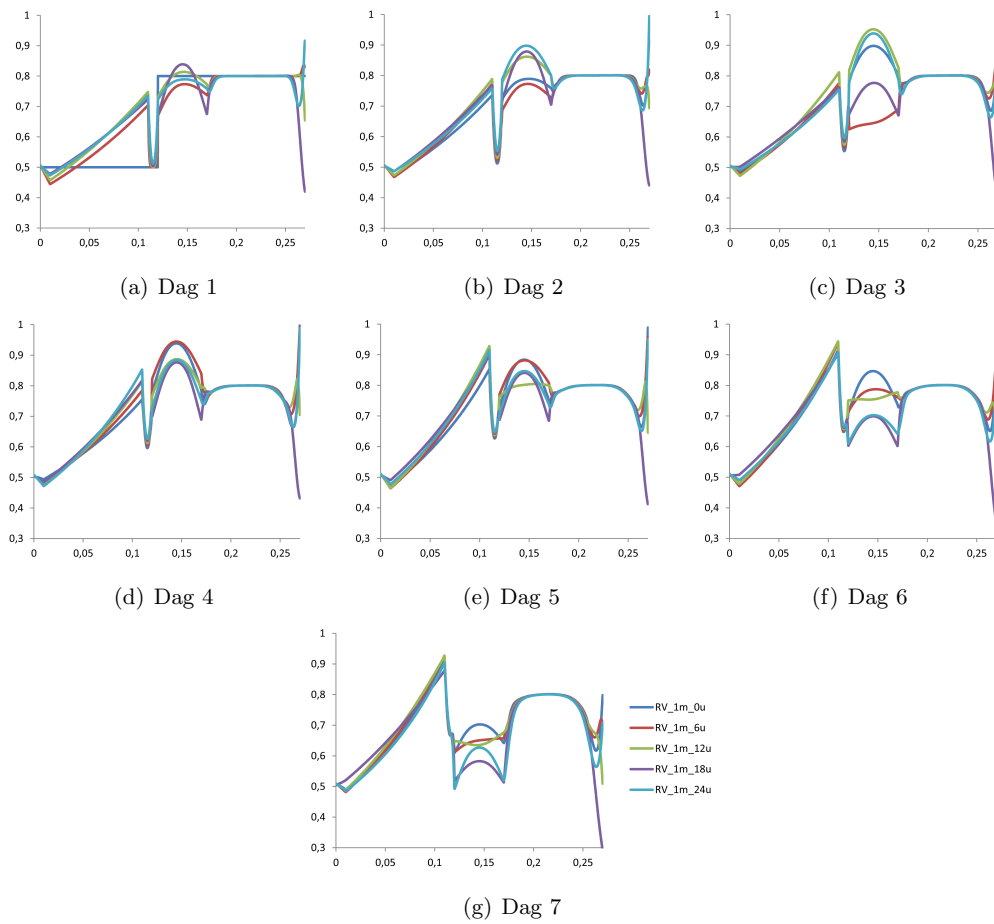
Figuur C.1: Temperatuursprofiel [°C] over de breedte van de spouw [m] op 1 m hoogte in de winter bij toepassing van een *Celit*-plaat.



Figuur C.2: Profiel van de relatieve vochtigheid [%] over de breedte van de spouw [m] op 1 m hoogte in de winter bij toepassing van een *Celit*-plaat.



Figuur C.3: Temperatuursprofiel [°C] over de breedte van de spouw [m] op 1 m hoogte in de winter bij toepassing van een OSB-plaat.



Figuur C.4: Profiel van de relatieve vochtigheid [%] over de breedte van de spouw [m] op 1 m hoogte in de winter bij toepassing van een OSB-plaat.

Bijlage D

Weeksimulaties: variabele randcondities

tijd [s]	T [°C]	RV	RV [%]	p_sat [Pa]	Y [-]	straling [W/m^2]	onderkoeling [°C]
0	7,1	0,83	83	1009,994	0,00515386	0	20
3600	6,6	0,89	89	975,8173	0,00534003	0	20
7200	6,8	0,82	82	989,364	0,00498726	0	20
10800	6,8	0,79	79	989,364	0,00480426	0	20
14400	6,9	0,73	73	996,1991	0,00446914	11	20
18000	6,9	0,76	76	996,1991	0,00465332	32	20
21600	6,9	0,78	78	996,1991	0,00477614	44	20
25200	6,7	0,78	78	982,5701	0,00471061	52	0
28800	6,8	0,76	76	989,364	0,00462131	58	0
32400	6,9	0,77	77	996,1991	0,00471473	63	0
36000	7,3	0,79	79	1023,957	0,00497275	70	0
39600	7,3	0,85	85	1023,957	0,00535166	82	0
43200	8,2	0,82	82	1088,911	0,00549074	145	0
46800	8,8	0,82	82	1134,2	0,00571991	336	0
50400	9,1	0,82	82	1157,459	0,00583762	512	0
54000	9,3	0,8	80	1173,196	0,00577245	621	0
57600	8,8	0,84	84	1134,2	0,00585992	661	20
61200	8,7	0,85	85	1126,539	0,00588973	616	20
64800	8,8	0,86	86	1134,2	0,00599995	453	20
68400	8,8	0,88	88	1134,2	0,00614	211	20
72000	9,3	0,86	86	1173,196	0,00620702	0	20
75600	9	0,88	88	1149,66	0,00622401	0	20
79200	9,3	0,86	86	1173,196	0,00620702	0	20
82800	9,4	0,86	86	1181,135	0,00624918	0	20
86400	10,1	0,79	79	1238,042	0,00601626	0	20
90000	9,4	0,88	88	1181,135	0,00639508	0	20
93600	9,4	0,78	78	1181,135	0,00566586	0	20
97200	8,9	0,74	74	1141,907	0,00519528	0	20
100800	8,6	0,66	66	1118,923	0,00453855	11	20
104400	8,5	0,7	70	1111,353	0,00478176	32	20
108000	8,2	0,78	78	1088,911	0,00522205	44	20
111600	7,6	0,83	83	1045,219	0,0053342	52	0
115200	7,5	0,84	84	1038,089	0,00536173	58	0
118800	7,8	0,86	86	1059,609	0,00560401	63	0
122400	8,6	0,82	82	1118,923	0,0056426	70	0
126000	7,8	0,93	93	1059,609	0,00606184	82	0
129600	8,9	0,87	87	1141,907	0,00611137	145	0
133200	9,3	0,86	86	1173,196	0,00620702	336	0
136800	8,9	0,87	87	1141,907	0,00611137	512	0
140400	8,6	0,86	86	1118,923	0,00591884	621	0
144000	8	0,91	91	1074,172	0,00601282	661	20
147600	8,3	0,9	90	1096,347	0,00606972	616	20
151200	8,9	0,9	90	1141,907	0,00632292	453	20
154800	9,9	0,88	88	1221,543	0,00661474	211	20
158400	11,1	0,83	83	1323,509	0,00676029	0	20

162000	10,8	0,85	85	1297,342	0,00678641	0	20
165600	10	0,9	90	1229,768	0,00681145	0	20
169200	10,2	0,89	89	1246,365	0,00682673	0	20
172800	10,4	0,91	91	1263,158	0,00707526	0	20
176400	10,6	0,92	92	1280,15	0,00725	0	20
180000	10,9	0,87	87	1306,013	0,0069934	0	20
183600	11	0,82	82	1314,736	0,00663406	0	20
187200	10,8	0,74	74	1297,342	0,00590501	11	20
190800	10,2	0,69	69	1246,365	0,00528769	32	20
194400	9,7	0,64	64	1205,236	0,0047411	44	20
198000	8,5	0,71	71	1111,353	0,00485027	52	0
201600	7,1	0,85	85	1009,994	0,00527845	58	0
205200	6,5	0,94	94	969,1054	0,00560213	63	0
208800	6,7	0,97	97	982,5701	0,00586217	70	0
212400	6,8	0,99	99	989,364	0,006025	82	0
216000	7,6	0,97	97	1045,219	0,00623736	145	0
219600	10,2	0,86	86	1246,365	0,00659569	336	0
223200	11,1	0,8	80	1323,509	0,00651497	512	0
226800	11,3	0,79	79	1341,211	0,0065196	621	0
230400	11,5	0,77	77	1359,119	0,00643908	661	20
234000	11,4	0,79	79	1350,139	0,00656317	616	20
237600	11,4	0,79	79	1350,139	0,00656317	453	20
241200	11,5	0,77	77	1359,119	0,00643908	211	20
244800	11,8	0,76	76	1386,376	0,00648308	0	20
248400	11,7	0,77	77	1377,237	0,00652526	0	20
252000	11,4	0,83	83	1350,139	0,00689688	0	20
255600	10,4	0,94	94	1263,158	0,00730955	0	20
259200	10	0,96	96	1229,768	0,00726756	0	20
262800	9,7	0,93	93	1205,236	0,00689845	0	20
266400	9,6	0,96	96	1197,155	0,00707399	0	20
270000	9,8	0,92	92	1213,366	0,00687019	0	20
273600	9,6	0,89	89	1197,155	0,00655612	11	20
277200	9,8	0,91	91	1213,366	0,0067952	32	20
280800	9,1	0,96	96	1157,459	0,00683845	44	20
284400	8,6	0,93	93	1118,923	0,00640249	52	0
288000	8,9	0,93	93	1141,907	0,00653453	58	0
291600	8,4	0,93	93	1103,827	0,00631578	63	0
295200	8	0,87	87	1074,172	0,00574759	70	0
298800	7,7	0,87	87	1052,392	0,00563065	82	0
302400	7,5	0,9	90	1038,089	0,00574605	145	0
306000	7,7	0,86	86	1052,392	0,00556571	336	0
309600	7,1	0,9	90	1009,994	0,00559001	512	0
313200	7,7	0,87	87	1052,392	0,00563065	621	0
316800	7,4	0,84	84	1031,002	0,005325	661	20
320400	6,8	0,88	88	989,364	0,00535337	616	20
324000	7	0,9	90	1003,076	0,00555159	453	20

327600	7,2	0,85	85	1016,954	0,00531495	211	20
331200	6,6	0,88	88	975,8173	0,00527984	0	20
334800	6,6	0,88	88	975,8173	0,00527984	0	20
338400	6	0,89	89	936,1512	0,00512228	0	20
342000	5,4	0,91	91	897,9107	0,00502315	0	20
345600	5	0,9	90	873,1874	0,00483059	0	20
349200	4,6	0,9	90	849,0654	0,00469676	0	20
352800	4,9	0,89	89	867,101	0,00474337	0	20
356400	4,4	0,9	90	837,226	0,00463109	0	20
360000	4,7	0,9	90	855,0402	0,00472991	11	20
363600	4,7	0,89	89	855,0402	0,00467721	32	20
367200	4,5	0,89	89	843,1274	0,00461186	44	20
370800	3,4	0,94	94	780,1828	0,00450702	52	0
374400	3	0,93	93	758,3427	0,00433379	58	0
378000	2,7	0,94	94	742,3181	0,0042877	63	0
381600	3,3	0,93	93	774,6715	0,00442736	70	0
385200	4,7	0,84	84	855,0402	0,00441373	82	0
388800	5,6	0,8	80	910,5019	0,00447639	145	0
392400	6,1	0,8	80	942,662	0,00463495	336	0
396000	6,4	0,81	81	962,4341	0,00479177	512	0
399600	6,7	0,81	81	982,5701	0,00489233	621	0
403200	6,3	0,84	84	955,8032	0,00493544	661	20
406800	6	0,88	88	936,1512	0,00506455	616	20
410400	6,2	0,86	86	949,2126	0,00501836	453	20
414000	6,1	0,83	83	942,662	0,00480927	211	20
417600	5,6	0,86	86	910,5019	0,0048131	0	20
421200	5,5	0,85	85	904,187	0,00472389	0	20
424800	5,3	0,84	84	891,6728	0,00460336	0	20
428400	5	0,85	85	873,1874	0,00456148	0	20
432000	4,7	0,86	86	855,0402	0,00451911	0	20
435600	4,6	0,84	84	849,0654	0,00438281	0	20
439200	4,9	0,82	82	867,101	0,0043693	0	20
442800	5	0,81	81	873,1874	0,00434625	0	20
446400	5,1	0,82	82	879,3114	0,004431	11	20
450000	5	0,81	81	873,1874	0,00434625	32	20
453600	4,9	0,79	79	867,101	0,00420904	44	20
457200	4,1	0,82	82	819,7394	0,00413005	52	0
460800	4,3	0,79	79	831,361	0,00403512	58	0
464400	4,4	0,81	81	837,226	0,0041668	63	0
468000	5,1	0,82	82	879,3114	0,004431	70	0
471600	6,4	0,79	79	962,4341	0,00467312	82	0
475200	8	0,75	75	1074,172	0,00495242	145	0
478800	8,5	0,73	73	1111,353	0,00498731	336	0
482400	8,5	0,73	73	1111,353	0,00498731	512	0
486000	8,8	0,72	72	1134,2	0,00502022	621	0
489600	8,1	0,74	74	1081,519	0,00491972	661	20

493200	8,4	0,73	73	1103,827	0,00495344	616	20
496800	8,5	0,71	71	1111,353	0,00485027	453	20
500400	8,1	0,7	70	1081,519	0,00465303	211	20
504000	7,5	0,72	72	1038,089	0,00459362	0	20
507600	7,3	0,71	71	1023,957	0,00446781	0	20
511200	7,1	0,7	70	1009,994	0,00434449	0	20
514800	6,9	0,71	71	996,1991	0,00434637	0	20
518400	6,5	0,71	71	969,1054	0,00422786	0	20
522000	6,4	0,7	70	962,4341	0,00413939	0	20
525600	6,8	0,69	69	989,364	0,00419457	0	20
529200	6,8	0,68	68	989,364	0,00413363	0	20
532800	7	0,69	69	1003,076	0,00425285	11	20
536400	6,9	0,67	67	996,1991	0,00410089	32	20
540000	6,8	0,65	65	989,364	0,00395082	44	20
543600	6	0,68	68	936,1512	0,00391077	52	0
547200	6,1	0,66	66	942,662	0,00382194	58	0
550800	6,2	0,68	68	949,2126	0,00396547	63	0
554400	7	0,68	68	1003,076	0,00419106	70	0
558000	8,3	0,66	66	1096,347	0,00444673	82	0
561600	9,8	0,63	63	1213,366	0,00469838	145	0
565200	10,3	0,61	61	1254,737	0,00470435	336	0
568800	10,3	0,61	61	1254,737	0,00470435	512	0
572400	10,6	0,6	60	1280,15	0,004721	621	0
576000	10	0,62	62	1229,768	0,00468627	661	20
579600	10,2	0,61	61	1246,365	0,00467287	616	20
583200	10,6	0,59	59	1280,15	0,00464209	453	20
586800	10,1	0,59	59	1238,042	0,00448898	211	20
590400	9,5	0,6	60	1189,122	0,0043844	0	20
594000	8,4	0,6	60	1103,827	0,00406913	0	20
597600	6,4	0,62	62	962,4341	0,00366526	0	20
601200	3,8	0,64	64	802,5754	0,00315408	0	20
604800	3,8	0,64	64	802,5754	0,00315408	0	20

Bibliografie

- A. Alturkistani, P. Fazio, J. Rao & Q. Mao (2008). A new test method to determine the relative drying capacity of building envelope panels of various configurations. *Building and Environment*.
- Ansys (2011). Ansys fluent 12.0 - theory guide. URL <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent1/pdf/th/flth.pdf>.
- M. V. Belleghem (2011). Senitivity analysis of coupled cfd-ham model. *HEFAT2011*.
- M. V. Belleghem (2012). Modelling heat and moisture transport in porous materials with cfd for building applications. *HEFAT2012*.
- J. Carmeliet (2006). Coupled heat and mass transfer - theory moisture transport properties.
- T. Chilton & A. Colburn (1934). Mass transfer (absorption) coefficients - prediction from dat on heat transfer and fluid friction. *Industrial and Engineering Chemistry*.
- Chown, Brown & Poirier (2011). Evolution of wall design for controlling rain penetration. URL <http://www.nrc-cnrc.gc.ca:eng:ibp/irc/ctus/ctus-n9.html>.
- D. Davidovic, J. Srebric & E. Burnett (2005). Modeling convective drying of ventilated wall chambers in building enclosures. *International Journal of Thermal Science*, 45(2):180–189.
- C. Debbissi, J. Orfi & S. B. Nasrallah (2000). Evaporation of water by free convection in a vertical channel including effects of wall radiative properties. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(4):811–826.
- T. Z. Desta, J. Langmans & S. Roels (2010). Experimental data set for validation of heat, air and moisture transport models of building envelopes. *Building and Environment*.
- D.Gossard, B. Lartigue & V. Sambou (2011). Nusselt number correlations for laminar convection in three-dimensional air-filled cavities. *Journal of Building Physics*, 35(4):327–337.
- M. Drzik, P. Mihalka & P. Matiasovsky (2012). Experimental and numerical analysis of the boundary layer on a vertical plate at low temperature differences. *Journal of Building Physics*, 35(4):309–326.

- P. Fazio, Q. Mao, H. Ge, A. Alturkistani & J. Rao (2007). Test method to measure the relative capacity of wall panels to evacuate moisture from their stud cavity. *Jouranal of Architectural Engineering*.
- G. Gan (2011). General expressions for the calculation of air flow and heat transfer rates in tall ventilation cavities. *Building and Environment*, 46(10):2069–2080.
- S. Gnoth, F. Hansel, P. Haupl & H. Fechner (2008). Aero-hygrothermisches verhalten von umfassungs-konstruktionen mit hohlraumen. *Bauphysik*, 30(6).
- A. Gustavsen & J. V. Thue (2007). Numerical simulation of natural convection in three-dimensional cavities with a high vertical aspect ratio and a low horizontal aspect ratio. *Journal of Building Physics*, 30(3):217–240.
- H. Hens (1997). *Bouwphysica 1: warmte- en massatransport*. Acco.
- H. Hens (2005). The vapor diffusion resistance and air permeance of masonry and roofing systems. *Building and Environment*, 41(6):745–755.
- H. Hens & A. Janssens (2007). Brick cavity walls: A performance analysis based on measurements and simulations. *Journal of Building Physics*, 31(2):95–124.
- IEA (2000). *Annex 24 Heat Air and Moisture transfer in new and retro-fitted insulated envelope parts*. International Energy Agency.
- A. Janssens (1997). Iwt vliet/930235 tweede jaarrapport, deel 3: Zinken daken.
- A. Janssens (2008). Syllabus bij de cursus bouwfysische aspecten van gebouwen, ugent.
- T. Kalamees & J. Vinha (2002). Hygrothermal calculations and laboratory tests on timber-framed wall structures. *Building and Environment*, 38(5):689–697.
- A. N. Karagiozis & H. M. Kuenzel (2009). The effect of air cavity convection on the wetting and drying behavior of wood-frame walls using a multi-physics approach. *Journal of ASTM International*, 6(10).
- W. Kays & M. Crawford (1993). *Convective Heat and Mass transfer*. McGraw-Hill.
- E. Künzle (1995a). *imultaneous heat and moisture transport in building components - one and two dimensional calculation using simple parameters*. Ph.D. thesis, Stuttgart.
- H. Künzle (1995b). *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components*. Ph.D. thesis, Fraunhofer Institute of Building Physics.
- H. M. Künzle (2011). Wufi-wiki. URL <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php5/Hauptseite>.

- J. Lewis (1970). Heat transfer predictions from mass transfer measurements around a single cylinder in cross flow. *International Journal Heat Mass Transfer*, 14:325–329.
- Q. Mao, P. Fazio & J. Rao (2009). In-cavity evaporation allowance-a drying capacity indicator for wood-frame wall system. *Building and Environment*, 44(12):2418–2429.
- E. Mayer & E. Künzle (1983). Untersuchungen über die notwendige hinterlüftung an aussenwandbekeidung aus grossformatigen bauteilen. *Franhofer Institut für Bauphysik*.
- K. Nore, B. Blocken & J. Thue (2009). On cfd simulation of wind-induced airflow in narrow ventilated facade cavities: Coupled and decoupled simulations and modelling limitations. *Building and Environment*, 45(8):1834–1846.
- S. V. Pankar (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Taylor and Francis Group, LLC.
- A. Piot, M. Woloszyn, J. Brau & C. Abele (2011). Experimental wooden frame house for the validation of whole building heat and moisture transfer numerical models. *Energy and Buildings*, 43(6):1322–1328.
- A. Rodrigues & L. Aelenei (2009). Thermal performance of a naturally ventilated cavity wall. *International Journal of Energy Research*, 34(4):357–372.
- H. H. Saber (2011). Investigation of thermal performance of reflective insulations for different applications. *Building and Environment*, 52:32–44.
- D. Saelens & H. Hens (2001). Experimental evaluation of airflow in naturally ventilated active envelopes. *Journal of Building Physics*.
- M. Salonvarra, A. N. Karagiozis, M. Pazera & W. Miller (2007). Air cavities behind claddings - what have we learned. *ASHRAE*.
- C. Sanjuan, M. Suarez, M. Gonzalez, J. Pistono & E. Blanco (2011a). Energy performance of an open-joint ventilated facade compared with a conventional sealed cavity facade. *Solar Energy*, 85(9):1851–1863.
- C. Sanjuan, M. J. Suarez, M. Gonzalez, J. Pistono & E. Blanco (2011b). Energy performance of an open-joint ventilated facade compared with a conventional sealed cavity facade. *Solar Energy*, 85(9):1851–1863.
- R. Siegel & J. Howell (1998). *Handbook of Heat Transfer*. McGraw-hill.
- H.-J. Steeman (2009). *Modellering van lokale hygrothermische interactie tussen luchtstromingen en poreuze materialen voor toepassing in gebouwen*. Ph.D. thesis, UGent.
- T. Stovall & A. Karagiozis (2005). Cfd analysis of a ventilated brick cavity. *ASHRAE*.

- Straube (2009). *Moisture Control and Enclosure Wall Systems*. Ph.D. thesis, University of Waterloo.
- J. Straube & G. Finch (2009). Ventilated wall claddings: Review, field performance, and hygrothermal modeling. *Building Science Press*.
- E. Vereecken & S. Roels (2012). Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation. *Building and Environment*, 51:296–310.
- H. Viitanen & J. Vinha (2008). Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures. *Journal of Building Physics*, 33(3).