Hygrothermisch gedrag van compacte platte daken in passiefhuizen

Robbe Verelst

Promotoren: prof. Jan Moens, prof. dr. ir. Arnold Janssens
Begeleiders: Nathan Van Den Bossche, ir.-arch. Glenn De Meersman

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

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: prof. dr. Pieter Uyttenhove
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2013-2014

UNIVERSITEIT GENT

Hygrothermisch gedrag van compacte platte daken in passiefhuizen

Robbe Verelst

Promotoren: prof. Jan Moens, prof. dr. ir. Arnold Janssens
Begeleiders: Nathan Van Den Bossche, ir.-arch. Glenn De Meersman

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

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: prof. dr. Pieter Uyttenhove
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2013-2014

UNIVERSITEIT GENT

VOORWOORD

Voraleer over te gaan naar het eigenlijke onderzoek, wens ik enkele mensen te bedanken: Beide promotoren voor de vele interessante lessen doorheen de jaren en de nodig hulp bij het voltooien van deze thesis. De begeleiders die altijd klaarstonden voor de nodige antwoorden op mijn vragen, in het bijzonder Glenn De Meersman voor de nodige hulp bij het installeren van de meetapparatuur en het maken van de WUFI-simulaties.

Verder ook Mathy Bevernage voor het mogelijk maken van dit onderzoek en zijn beschikbaarheid bij het uitlezen van de metingen. Tenslotte mijn persoonlijke omgeving voor de nodige steun, hulp, maar ook ontspanning.

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

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

Robbe Verelst, 1 juni 2014

HYGROTHERMISCH GEDRAG VAN COMPACTE PLATTE DAKEN IN PASSIEFHUIZEN

door

Robbe Verelst

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

Promotoren: prof. Jan Moens, prof. dr. Arnold Janssens
Begeleiders: Nathan Van Den Bossche, Glenn De Meersman

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: prof. dr. Pieter Uyttenhove
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2013 – 2014

Trefwoorden: Compact plat dak, duurzaamheid, vochtgedrag, WUFI, houtskeletbouw.

HYGROTHERMAL BEHAVIOR OF COMPACT FLAT ROOFS IN PASSIVE HOUSES

ROBBE VERELST

Supervisors: prof. dr. ir. arch. A. Janssens, prof. J. Moens, dr. ir. arch. N. Van Den Bossche, ir. arch. G. De Meersman

Abstract – Many parameters influence the hygrothermal behavior of the compact flat roof. The purpose of this study is to observe a test setting and to create a realistic model in WUFI. After performing the measurements on the test roof, and the comparison with the results of the WUFI model, some research cases are investigated. Most of these cases confirm the safety of this construction, where there are no risks on degradation; except for the shading of the roof.

Keywords – Compact flat roof, durability, moisture, WUFI, wood frame construction.

I. Introduction

The compact flat roof is more and more used in the construction of passive houses, because of the limited height at the same insulation thickness, the use of non-pressureproof insulation (reduced cost) and a simple connection of the vapor barrier on the walls.

From previous studies, a number of conclusions could be made about the safety of various roof structures. Some conclusions, such as the importance of solar radiation on the roof, come forward in previous research [1],[2]. Other findings, however, are specific to a particular test model; the materials used, initial conditions and the prevailing circumstances. Thus, the findings of any investigation will not necessarily apply to the other studies, and so there remain uncertainties about the safety of the structure.

In further research, the aim is to observe a test setting in Ronse and creating a realistic computer model with WUFI 2D. After performing the measurements on the test roof, and the comparison with the results of the WUFI model, some research cases are investigated.

II. Construction & Materials

Field test

The measurements are taken on a compact roof in a passive house, above the bathroom where there are eight different roof structures with built-in sensors (moisture, temperature, relative humidity) under the OSB-sheathing. Also the outdoor and indoor climate is measured. The roof has the following composition from the exterior tot the interior:

- Roofing membrane: black bitumen, solar absorption coeff. = 0,89
- OSB-sheathing: 18 mm, 560 kg/m³
- Wooden I-beams, with insulation layer: cellulose fibers or wood fibers
- Vapor barrier: smart vapor retarder DB+ or Intello, PE-foil or OSB-sheathing 15 mm
- Air layer: 20 mm
- Gypsum board: 12 mm

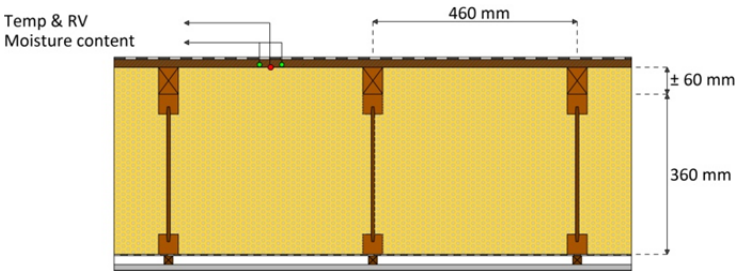


FIGURE 1 - PLACEMENT OF MEASUREMENT EQUIPMENT.

There are eight compartments based on the different insulation materials and vapor barriers. The μ-value of the OSB is 150; the μd value of the PE-foil is 10m. The smart vapor retarder DB+ and Intello go from 0,6 to 4m and 0,25 to 18m. The density of the insulation materials is 35 kg/m³ for wood fiber insulation and 45 kg/m³ for cellulose, with μ=1,5 for both materials.

Simulation WUFI 2D

Next to the measurements, a numerical simulation for all construction variants is carried out with a program for coupled heat and moisture transport (WUFI 2D). Therefore, measured data of the outdoor climate were used. Also some laboratory test where carried out to control the sorption isotherm, diffusion resistance and capillary suction. Based on these simulations additional calculations were done to investigate the influence of some material parameters, the indoor climate, initial conditions, shading of the surface and leakage.

III. Results and discussion

A. Validating simulation

For the temperature, there is a good correlation between measurements and simulation. The similarity between the measurements of the temperature of the compartments was also very good. Only at night the temperature drops a little further back in the measurements. For the relative humidity, only sections 1 to 4 correspond with the results of the simulation. Section 5 to 8 give a lower value than expected.

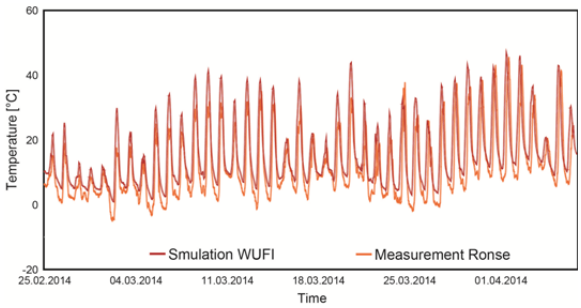


FIGURE 2 - TEMPERATURE TEST ROOF.

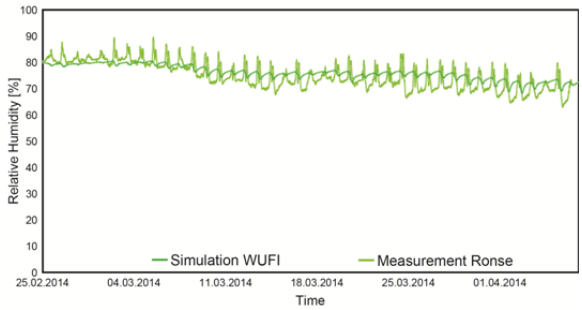


FIGURE 3 - RELATIVE HUMIDITY TEST ROOF.

B. Case studies

Influence vapor barriers

In the test building the differences between the vapor barriers were very small, the moisture content of all compartments was lower than 20 M% (just after winter), which still indicates that there is no risk of degradation. The simulations come to a similar conclusion, with small differences, although the constructions with smart vapor barriers dry out faster than the OSB-sheathing and PE-foil. Another problem that may occur is condensation on the inside of the barrier in summer. To assess this, we examine the relative humidity of the insulation just above the barrier, where the relative humidity rarely rises above 80%. In none of the cases condensation occurs.

Initial moisture content

When finishing the roof it's always possible that a certain amount of moisture is trapped in the roof structure. Essential to the continued life of the roof is that the roof dries as quickly as possible, without being damaged. To investigate, we increase the moisture content of the sheathing. After one summer the moisture content almost reaches the equilibrium state. In full sunlight the roof has the ability to dry out very fast.

Interior climate

The construction can be exposed to very divergent moisture loads (bathrooms or kitchens). All tested indoor climates answer to the terms; nevertheless the indoor climate has a great influence on the moisture gradient in the roof structure. In this event the smart vapor barriers can really make a difference.

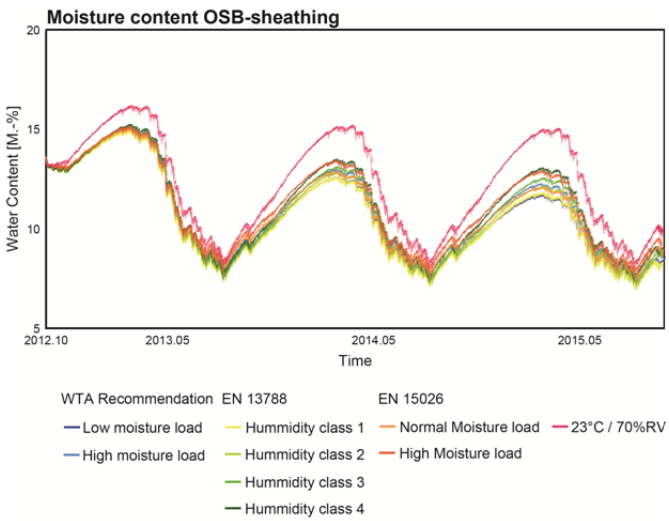


FIGURE 4 - SIMULATION INTERIOR CLIMATE (INTELLO).

Use of other materials

In the test case two moist-buffering insulation materials were used. The difference between these was very small. Other insulation materials, which take up less moist, like mineral wool and PUR lower the moisture content of the wooden sheathing according to the simulation. Field experiments by Winter ea [3] however lead to a different conclusion.

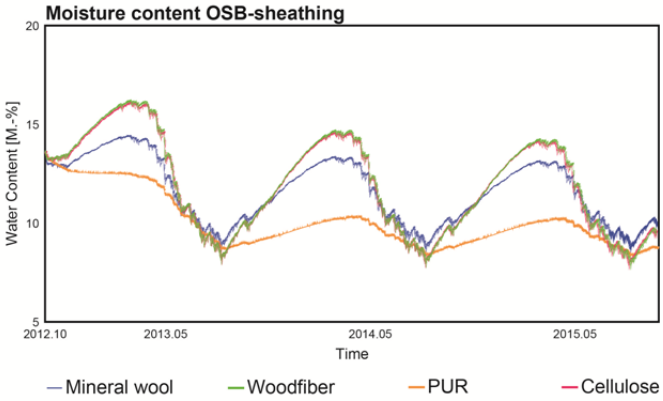


FIGURE 5 - SIMULATION DIFFERENT INSULATION MATERIALS.

Also other materials can be used for the sheathing, apart from OSB. The result of wooden planking (pine) is worse than the OSB, and can lead to biological degradation and germination of fungi. The moisture content in fibercementboards is lower and the risk on degradation is lower. For slope wedges the choice of the material is also important. The humidity conditions are very high and the moisture storage function of the wood can't be too high in order to avoid fungi.

Shading of the roof surface

An essential element in the behavior of the compact roof is the solar radiation; however the roof is sometimes shaded by another building, solar panels or a green roof. Due to the lower temperature the moisture at the top is not transported into the interior of the roof after the winter period and thus cannot dry out. Even when using the smart vapor barriers, this will lead to a risk of biological degradation.

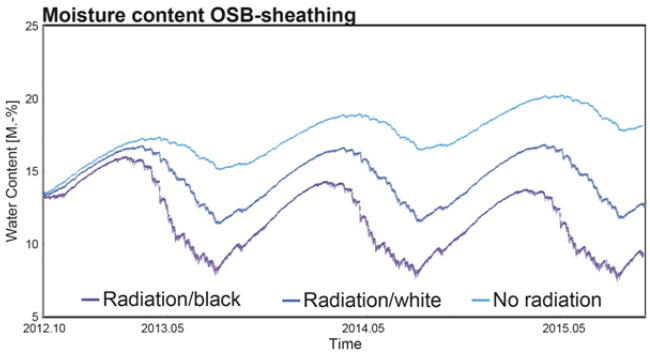


FIGURE 6 - SIMULATION SHADING/WHITE SURFACE (INTELLO).

In the case a white roof (solar absorption = 0,4) is used, we get a very slight increase in moisture. The risk of damage is smaller here, although it may possibly occur, especially in the case of high initial moisture contents or leakage. Only for the PE-foil the moisture content stabilizes below the critical 20 M%. This seems the best option in case of shading, although shading can better be avoided.

Leakage

A difficult factor to evaluate is leakage. The infiltration of moist air from the interior can enhance the moisture in the roof, although in good conditions the drying-potential of the roof is high enough to neutralize this. Convection in the roof can even help to dry out the moisture in the top of the roof.

IV. Conclusions

The hygrothermal behavior of the compact flat roof depends on many factors, which creates many uncertainties about the safety of the roof. The moisture content of all compartments measured in the test setup is below 20 M% after the winter (average 16 M% as in the simulations). Nothing here indicates a risk of damage.

The simulations lead to some advantages of materials or setups, but none had a very high risk on degradation, except for the shading of the roof. With a good solar radiation and good insulation, there is no risk of damage and the compact flat roof construction is reliable. However, further research is needed if solar panels are placed or the roof is shaded by surrounding buildings and thus only a limited amount of sunlight reaches the roof.

References

[1] NUSSER, B., TEIBINGER, M., BEDNAR, T., Low-pitched timber roofs, World conference on timber engineering, 2010.

[2] BLUDAU, C., KÜNZEL, H.M., ZIRKELBACH, D., Hygrothermal performance of flat roofs with construction moisture, ASHRAE Buildings XI, 2010.

[3] WINTER, S., FÜLLE, C., WERTHER, N., SIEDER, M., Experimental and numerical study on the hygrothermal behavior of nonventilated wooden flat roof constructions with ecological building products, World conference on timber engineering, 2010.

INHOUDSOPGAVE

Inleiding 1
1. Warmte- en vochttransport in constructies 2
1.1 Inleiding 2
1.2 Hygrische eigenschappen 2
1.2.1 Vochtopslag 2
1.2.2 Hysteresis 5
1.2.3 Vochttransport in poreuze materialen 5
1.2.4 Damptransport 6
1.2.5 Vloeibaar vochttransport 7
1.2.6 Vochttransport in oververzadigde materialen 8
1.2.7 Oplossingsdiffusie 8
1.2.8 Vochttransport onder het vriespunt 9
1.3 Bepalen van de hygrische materiaaleigenschappen 9
1.3.1 De hygroscopische curve 10
1.3.2 Waterdamppermeabiliteit 10
1.3.3 Vloeibare vochttransport: waterabsorptiecoëfficiënt 12
1.4 Thermische eigenschappen 13
1.4.1 Warmteopslag 13
1.4.2 Warmtetransport 14
1.5 Modelleringstechnieken 15
1.5.1 Inleiding 15
1.5.2 De Glasermethode 15
1.5.3 WUFI 16
2. Gevolgen van vocht 19
2.1 Inleiding 19
2.2 Condensatie 19
2.2.1 Vochtgehalte in materialen 19
2.3 Sterkte-eigenschappen en hygrische vervormingen 20
2.4 Corrosie 21
2.5 Biologische aantasting 21
2.5.1 Houtaantastende schimmels 21
2.5.2 Lagere schimmels 22
2.5.3 Voorwaarden voor ontkieming en schimmelgroei 23
2.5.4 Schimmelontwikkeling voorspellen 25
2.5.5 WUFI-Bio 29

3. Vocht en daken 30
3.1 Inleiding 30
3.2 Vochtbronnen 30
3.2.1 Bouwvocht 30
3.2.2 Dampdiffusie doorheen de dampremmende laag 30
3.2.3 Convectie 31
3.2.4 Laterale diffusie 31
3.2.5 Regendoorslag 31
3.2.6 Capillaire opzuiging van condensatie (koudebruggen) 31
3.2.7 Uitzonderlijke situaties 31
3.3 Vochtstrategiën 31
3.4 Verschillende houten plattedakopbouwen 32
3.4.1 Warm dak 32
3.4.2 Omkeerdak 32
3.4.3 Koud dak 33
3.4.4 Compact dak 33
4. Eerder onderzoek 36
4.1 Inleiding 36
4.2 Künzel in Holzkirchen 36
4.3 Derome in Montreal 39
4.4 Rapport Janssens voor IsoproC 41
4.5 Winter ea. in Leipzig 42
4.6 Geving en Holme 45
4.7 Nusser ea. 47
4.8 Samenvatting 49
Onderzoeksvraag/Probleemstelling 50
5. Dakopbouw en materialen 51
5.1 Inleiding 51
5.2 Dakopbouw 52
5.3 Materialen 54
5.3.1 Spanten 54
5.3.2 Isolatie 55
5.3.3 Dampschermen 55
5.4 Metingen 56
5.4.1 Buiten- en binnenklimaat 56
5.4.2 De Temperatuur 58
5.4.3 De Relatieve vochtigheid 59

5.4.4 Het Houtvochtgehalte 60
6. Validatie van materiaaleigenschappen 63
6.1 Inleiding 63
6.2 Opstellen sorptiecurve 63
6.2.1 Algemeen 63
6.2.2 Opstelling 64
6.2.3 Resultaten 65
6.3 De dampdiffusieproef 66
6.3.1 Algemeen 66
6.3.2 Opstelling 67
6.3.3 Resultaten 68
6.4 De capillariteitsproef 69
6.4.1 Algemeen 69
6.4.2 Opstelling 69
6.4.3 Resultaten 70
7. Simulaties adhv WUFI 2D 72
7.1 Vergelijking metingen en simulaties 72
7.1.1 Opbouw simulatiemodel 72
7.1.2 Resultaten 75
7.2 Onderzoekscases 77
7.2.1 Inleiding 77
7.2.2 Case 1: Dampschermen 80
7.2.3 Case 2: Initieel vochtgehalte 82
7.2.4 Case 3: Binnenklimaat 84
7.2.5 Case 4: Andere materialen 87
7.2.6 Case 5: Beschaduwing van het dakoppervlak 95
7.2.7 Case 6: Lekkage 100
Conclusie 103
Bijlagen 105
Bijlage A: Resultaten proeven: Bepaling hygrische eigenschappen 105
Bijlage B: Technische fiches 105
Bijlage C: Metingen compact dak te Ronse 105
Bijlage D: Vergelijking metingen & simulatie WUFI 105
Bijlage E: Resultaten onderzoekscases 105
Bibliografische referenties 106

GEBRUIKTE SYMBOLEN

α	[W/m²K]	Warmteovergangscoëfficiënt
δ	[kg/(m.s.Pa)]	Damppermeabiliteit
δ_a	[kg/(m.s.Pa)]	Damppermeabiliteit van lucht
ε	[m³/m³]	Porositeit
$\varepsilon(x)$	[%]	Relatieve fout op de waarde van x
ϵ	[-]	Emissiefactor
θ	[°]	Contacthoek
θ	[°C]	Temperatuur
θ_{si}	[°C]	Binnenoppervlaktetemperatuur
θ_i	[°C]	Binnentemperatuur
θ_e	[°C]	Buitentemperatuur
λ	[W/mK]	Thermische geleidbaarheid
μ	[-]	Waterdampdiffusieweerstand
μd	[m]	Equivalte dampdiffusiedikte
ρ	[kg/m³]	Massadichtheid
ρ_d	[kg/m³]	Massadichtheid droog materiaal
ρ_w	[kg/m³]	Massadichtheid van water
σ	[N/m]	Oppervlaktespanning
σ	[W/m²K⁴]	Boltzmann constante
φ	[-]	Relatieve vochtigheid
ψ	[m³/m³]	Vochtgehalte
a_w	[-]	Wateractiviteit
A	[m²]	Oppervlakte
A	[kg/m².√s]	Waterabsorptie-coëfficiënt
b	[-]	Benaderingsfactor
b	[m]	Breedte
B	[m/√s]	Waterpenetratiecoëfficiënt
c	[J/kgK]	Soortelijke warmte
c_d	[J/kgK]	Soortelijke warmte van het droog bouwmateriaal
c_w	[J/kgK]	Soortelijke warmte van vloeibaar water
c_e	[J/kgK]	Soortelijke warmte van ijs
c_{out}	[kg/m³]	Waterdampconcentratie in de buitenlucht
c_{vent}	[kg/m³]	Waterdampconcentratie in de geventileerde laag
d	[m]	Dikte
d_a	[m]	Dikte van de luchtlaag
d_{vent}	[m]	Dikte van de geventileerde laag
D_φ	[kg/m.s]	Vloeibare geleidingscoëfficiënt
D_w	[m²/s]	Vloeibare transportcoëfficiënt
D_{WS}	[m²/s]	Vloeibare transportcoëfficiënt, suctie
D_{WW}	[m²/s]	Vloeibare transportcoëfficiënt, herverdeling
f	[-]	Fractie
F	[-]	Zichtfactor
g_v	[kg/m²s]	Dampflux
g_w	[kg/m²s]	Vloeibare waterflux
g_{me}	[kg/m²s]	Dampstroomdichtheid met ‘masked edge’

G	[kg/s]	Waterdampstroom
H	[J/kg]	Enthalpie
H_d	[J/m³]	Soortelijke enthalpie van het droog materiaal
H_w	[J/m³]	Soortelijke enthalpie van het vocht in het materiaal
h_v	[J/kg]	Latente warmte
m	[kg]	Massa
m_0	[kg]	Droge massa
m	[kg/m²]	Opgezogen hoeveelheid water per contactoppervlakte-eenheid
p	[Pa]	Dampdruk
q	[W/m²]	Warmteflux
r	[m]	Capillaire radius
R	[mm/h]	Driving rain
R_v	[J/kg.K]	Gasconstante voor waterdamp
S	[m²]	Oppervlakte
S	[m]	4 x de testoppervlakte / omtrek
S_h	[W/m³]	Warmtebron of –afname
S_w	[kg/m³s]	Vochtbron of –afname
t	[s]	Tijd
T	[K]	Absolute temperatuur
T_o	[K]	Omgevingstemperatuur
T_s	[K]	Oppervlaktetemperatuur
u	[kg/kg]	Vochtgehalte
U	[V]	Spanning
V	[m³]	Volume
w	[kg/m³]	Vochtgehalte
w_c	[kg/m³]	Capillair vochtgehalte
w_{ev}	[kg/m³]	Evenwichtsvochtgehalte
w_{cr}	[kg/m³]	Kritisch vochtgehalte
w_f	[kg/m³]	Vrije waterverzadiging
w_{max}	[kg/m³]	Maximaal vochtgehalte
W_c	[kg/(m².s.Pa)]	Gecorrigeerde waterdamppermeabiliteit
x	[m]	Penetratiediepte
Z	[m².s.Pa/kg]	Dampdiffusieweerstand

ACH	[1/h]	Air change rate
BKK		Binnenklimaatsklasse
LIM		Lowest Isopleth for Mould
RV		Relatieve vochtigheid
TOW		Time of Wetness
WC		Water Content

INLEIDING

Het compacte platte dak wordt meer en meer toegepast in de bouw van passiefwoningen, omwille van de beperkte opbouwhoogte bij eenzelfde isolatiedikte, het gebruik van niet-drukvaste isolatiematerialen (verminderde kostprijs) en een eenvoudige aansluiting van het dampscherm op de muren. Er zijn echter ook enkele nadelen en onzekerheden verbonden aan dit daktype. Deze zullen doorheen dit werk verder besproken en onderzocht worden.

Het principe van het compacte dak is gebaseerd op bevochtiging van de constructie in de winter, door dampdiffusie doorheen het dampscherm, en dat zich voornamelijk zal accumuleren bovenaan in de constructie. Tijdens de zomermaanden zal het dak opwarmen, waardoor de dampdruk stijgt en het vocht naar binnen gedreven wordt doorheen de damprem. Het dak zal zo terug uitdrogen. Dit jaarlijks wederkerend fenomeen kan echter tot schade in de dakconstructie leiden, indien het vochtgehalte in de constructie te hoog oploopt.

Het doel van dit werk is, op basis van metingen in een testopstelling, een realistisch model op te stellen aan de hand van het softwarepakket WUFI. In dit model kunnen dan verschillende parameters bekeken worden die een negatieve invloed hebben op de hygrische werking van het dak. Gebaseerd op de resultaten van de testopstelling en simulatiemodellen, is het de bedoeling een beter inzicht te krijgen in het hygrothermische gedrag van het compacte platte dak, en zo enkele richtlijnen te kunnen opstellen om de hygrische veiligheid van dit daktype te verbeteren.

Het eerste deel, de literatuurstudie, bestaat uit 4 hoofdstukken. In het 1ste hoofdstuk wordt het warmte- en vochttransport in constructies besproken. Hierbij worden de transportmechanismen en opslag behandeld, alsook hoe de materiaaleigenschappen bepaald kunnen worden. Daarna volgt de modellering van de constructie, aan de hand van WUFI. Hoofdstuk 2 gaat over de gevolgen van vocht: condensatie, corrosie, biologische aantasting en welke modellen bestaan om deze te voorspellen. Het 3de hoofdstuk behandelt de combinatie van vocht en daken. Hierin bekijken we enkele vochtbronnen, strategieën en de verschillende mogelijke opbouwen voor platte daken. Hoofstuk 4 overloopt de eerdere onderzoeken die gevoerd werden naar de werking van het compacte platte dak, met de bijhorende testopstellingen, resultaten en conclusies.

Deel 2, het eigen onderzoek, wordt opgedeeld in 3 hoofdstukken. Het 5de hoofstuk bespreekt de opbouw van het dak dat verder getest zal worden, en de daarbij horende materialen. Ook worden de metingen op het testdak overlopen en kort besproken. Hoofdstuk 6 gaat verder in op de materiaaleigenschappen van de gebruikte materialen, de proefopstelling van enkele tests en een bespreking van de resultaten. Hoofdstuk 7 omvat de simulaties aan de hand van WUFI 2D. Eerst wordt de opbouw van een realistisch model behandeld, met de overeenkomst tussen metingen en simulaties. Daarna worden enkele onderzoekscases opgebouwd, die verschillende invloeden op het gedrag van de dakconstructie bespreken.

1. WARMTE- EN VOCHTTRANSPORT IN CONSTRUCTIES

1.1 INLEIDING

In het verdere onderzoek naar gevolgen van vocht, oppervlaktecondensatie en schimmelgroei speelt de modelering van het warmte- en vochtransport een grote rol. Het is nodig deze verschillende mechanismen van warmte-, lucht en vochttransport doorheen materialen en langs hun oppervlak te begrijpen om deze zo goed mogelijk te kunnen opnemen in het model en de randvoorwaarden zo goed als mogelijk te duiden. Elk bouwonderdeel wordt zo bepaald door zijn materiaaleigenschappen. Hierbij zijn zowel de hygrische, lucht als thermische eigeschappen van belang. Hens [32] maakt een onderscheid tussen:

1. Capacitieve eigenschappen: De mogelijkheid om warmte, vocht of lucht op te slaan in het materiaal;

2. Overdrachtseigenschappen: De mogelijkheid van warmte, vocht of lucht om in en doorheen het materiaal te stromen;

3. Gecombineerde eigenschappen: Een fysisch bepaalde combinatie tussen transport en opslag;

4. Eigenschappen, gebonden aan de verandering in warmte, lucht of vochthoeveelheid.

Belangerijk om te onthouden is dat deze waarden geen absolute constanten zijn, maar kunnen variëren onder verschillende parameters, zoals dichtheid, vochtgehalte, temperatuur en tijd.

1.2 HYGRISCHE EIGENSCHAPPEN

De hoeveeheid vocht in een materiaal kan op verschillende manieren bepaald worden, het is dan ook nodig deze te duiden:

- De massa van het vocht per volume-eenheid van het droge materiaal:

$$w = \frac{m}{V} \quad [\frac{kg}{m^3}]$$

- De massa van het vocht per massa-eenheid van het droge materiaal:

$$u = \frac{m}{M} \,.100 \;\; [\%]$$

- Het volume van het vocht per volume-eenheid van het droge materiaal:

$$\psi = \frac{V_m}{V} \,.100 \quad [\%]$$

Om verwarring te vermijden worden deze best niet door elkaar gebruikt, en stelt men voor deze enkel in de juiste context te gebruiken [32].

- w is voor materialen met een onbelangrijke hygrische rek, zoals de steenachtige materialen;
- u wordt gebruikt voor materialen met een significante hygrische rek, houten of hout-gebaseerde materialen.
- ψ is voor zeer poreuze materialen, zoals bepaalde isolatielagen.

1.2.1 VOCHTOPSLAG

Afhankelijk van de omgevingscondities, kan het vocht in een bouwmateriaal in de vaste, vloeibare of dampfase voorkomen, en in de microporiën kan het zelfs in een onbepaalde fysische staat voorkomen. In het poriënsysteem kunnen namelijk meerdere toestanden tegelijk optreden, afhankelijk van de poriëndiameterdistributie. Door capillaire condensatie zal in kleine poriën al condensatie optreden (dus

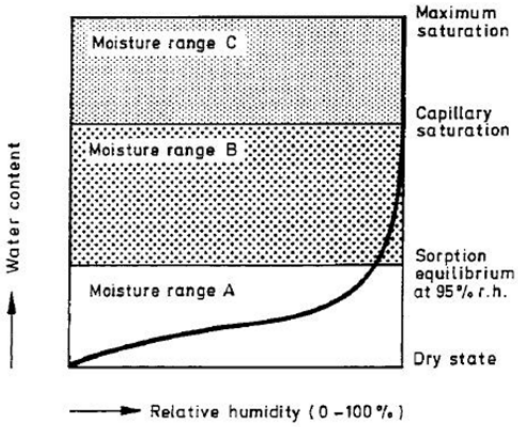
vloeibaar water) bij relatieve vochtigheden onder de 100%. Verder in de tekst worden verschillende termen door elkaar gebruikt. Bij water in de vloeibare fase spreekt men gewoon over water, bij waterdamp gaat het over water in de dampfase en bij vocht over een combinatie van deze twee, of wanneer de specifieke fase niet bepaald is.

Een bouwmateriaal noemt men droog wanneer dit geen water bevat, of enkel chemisch gebonden water. In contact met vochtige lucht zal een niet-hygroscopisch materiaal droog blijven, terwijl hygroscopische materialen de watermolecules zullen opnemen langs de binnenzijde van hun poriënstructuur totdat na verloop van tijd een evenwicht bereikt wordt met de vochtigheid van de omgeving. Dit is het evenwichtsvochtgehalte w_{ev} , dat afhankelijk is van de relatieve vochtigheid φ van de omgeving. Zet men w_{ev} uit in functie van φ bij een constante temperatuur, dan bekomt men de sorptie-isotherm. De afgeleide van w_{ev} naar φ wordt de volumieke soortelijke vochtcapaciteit $\rho\boldsymbol{\xi} = \frac{\boldsymbol{dw}}{\boldsymbol{d\varphi}}$ genoemd en geeft aan wat de vochthoeveelheid is die een materiaal kan bufferen bij toenemende relatieve vochtigheid. [56]

Als een materiaal in contact met water vocht absorbeert door capillaire zuiging, noemen we dit materiaal capillair-actief, indien dit niet het geval is, wordt het beschouwd als hydrofoob. Capillair-actieve materialen absorberen vloeibaar water totdat een bepaalde toestand van verzadiging ontstaat, vrije water verzadiging of capillaire verzadiging. Bij capillaire absorptie wordt een hoeveelheid lucht mee ingesloten, waardoor de capillaire verzadiging lager ligt dan de maximale verzadiging. Door langzame diffusie van de lucht uit het materiaal kan w_{max} bereikt worden. Hogere vochtgehaltes totaan het maximaal water-verzadigingspunt kunnen enkel bereikt worden wanneer een druk van buitenaf wordt aangebracht op het materiaal, of door waterdampdiffusie onder een bepaald tempertatuursgradiënt (hierbij treedt condensatie op, waardoor het materiaal zal oververzadigen). In het geval van capillair-actieve materialen spreekt men vaak van een kritische vochthoeveelheid w_{cr} . Deze waarde valt samen met het punt waarbij vochttransport enkel nog in vloeibare fase mogelijk is. Onder dit niveau wordt het vocht enkel vervoert in dampfase doorheen het materiaal.

De opslagcapaciteit van materialen is afhankelijk van zijn poriënstructuur. In theorie kan het materiaal vocht opnemen tot alle poriën gevuld zijn. In werkelijkheid is dit niet het geval. Om een inzicht te krijgen in de mogelijkheid tot vochtopslag in een materiaal dient men verder te kijken naar zijn omgevingscondities, met als belangrijkste factor de relatieve vochtigheid. Er zijn 3 fasen bij vochtopslag afhankelijk van de relatieve vochtigheid. Künzel [56] en Straube [78] spreken van 3 basismechanismen:

1. adsorptie op de materialen en poriënwanden door waterdampsorptie;
2. absorptie in de materialen door capillairwerking;
3. vrij water in de vorm van vloeibaar water.



FIGUUR 4 - SCHEMA VAN DE OPSLAGFUNCTIE VAN EEN HYGROSCOPISCH, CAPILLAIR-ACTIEF MATERIAAL [56].

Regio A: **Hygroscopische regio**

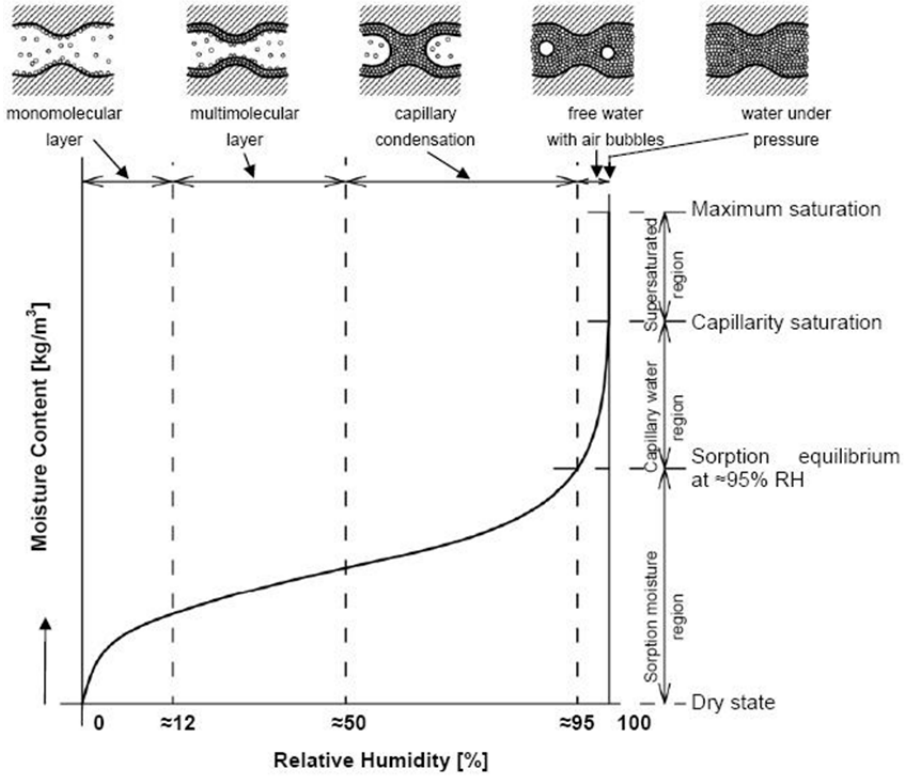
Deze regio reikt vanaf de droge toestand totaan een evenwichtstoestand rond de 95% relatieve vochtigheid. Het opnemen van het vocht gebeurt adhv moleculaire adsorptie van waterdamp: als gevolg van adhesie-krachten tussen het vaste celwandmateriaal en de watermoleculen worden deze moleculen aan het poriën begrenzende oppervlak gebonden; bij lage relatieve vochtigheid in een laag ter dikte van één molecule; bij hogere relatieve vochtigheid ook in meerdere lagen [87].

Regio B: **Capillaire water regio**

Het volgende gebied loopt totaan de vrije waterverzadiging van het bouwmateriaal w_f. De vochtopslag hangt hier af van de poriënstructuur en komt tot stand door capillaire condensatie. Dit verschijnsel is een gevolg van het feit dat in nauwe capillairen een verlaging van de maximumconcentratie boven de ter plaatse aanwezige meniscus optreedt.[1]

Regio C: **Oververzadigde regio**

Deze toestand kan niet meer bereikt worden door normale suctie. In de praktijk komt deze enkel voor door diffusie over een temperatuursgradiënt of door zuiging onder druk. In deze zone, boven het verzadigingspunt, doen zich geen evenwichtstoestanden meer voor. De relatieve vochtigheid is hier altijd 100% of meer. Dit doet zich bv. voor bij dauwvorming in isolatiematerialen. De vochtopslagcapaciteit wordt gegeven door het verschil tussen de maximum en vrije waterverzadiging, $\Delta w = w_{max} - w_f$ (omdat de helling van de vochtopslagfunctie oneindig wordt).



FIGUUR 5 - ABSORPTIE ISOTHERM VAN EEN HYGROSCOOP EN CAPILLAIR-ACTIEF BOUWMATERIAAL [76].

[1] Capillairen met een straal kleiner dan 5.10^{-8}m noemen we micro-capillairen; is de straal groter dan 5.10^{-8}m, dan spreken we over macro-capillairen.

Aan de hand van Kelvin's formule kunnen we het verband tussen de relatieve vochtigheid en de capillaire druk beschrijven:

$$\varphi = e^{\left(-\frac{2\sigma \cos\theta}{r\,\rho_w\,R_v\,T}\right)}$$

φ	[-]	Relatieve vochtigheid
σ	[N/m]	Oppervlaktespanning van water
θ	[°]	Contacthoek
r	[m]	Capillaire radius
ρ_w	[kg/m³]	Massadichtheid van water
R_v	[J/kg.K]	Gasconstante voor waterdamp
T	[K]	Absolute temperatuur

In WUFI wordt een benaderende formule gebruikt voor het opstellen van de vochtopslagfunctie (opdat bij een relatieve vochtigheid van 100% het vochtgehalte niet naar oneindig zou gaan) [56]:

$$w = w_f.\frac{(b-1).\varphi}{b-\varphi}$$

w	[kg/m³]	Evenwichtsvochtgehalte
w_f	[kg/m³]	Vrije water verzadiging
b	[-]	Benaderingsfactor

De benaderingsfactor moet altijd groter zijn dan 1, en wordt bepaald aan de hand van het evenwichtsvochtgehalte bij een relatieve vochtigheid van 80%.

1.2.2 Hysteresis

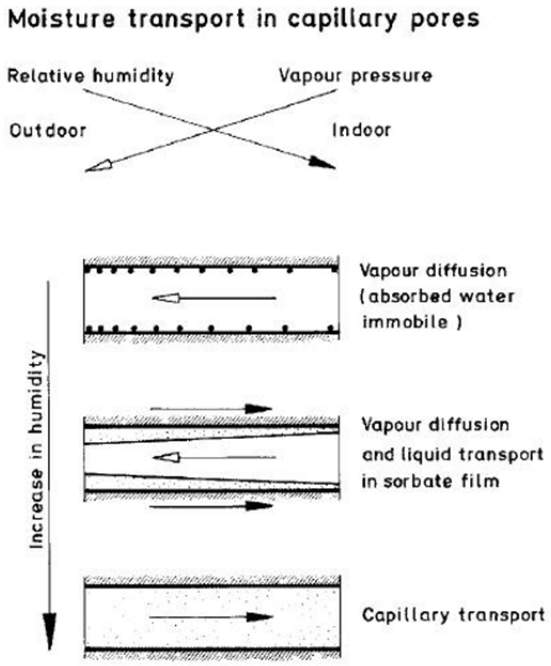
Bij het opstellen van de functies voor vochtopslag voor de verschillende materialen doet zich een bijzonder fenomeen voor: hysteresis. De hygroscopische curve bij bevochtiging ligt lager dan deze bij droging, omdat het opgenomen water deels zal binden met het materiaal en zo de droogsnelheid en het vochtgehalte zal beïnvloeden. Volgens Künzel [56] bekomt men langs beide wegen hetzelfde evenwicht en hij zal dan ook slechts één curve gebruiken per materiaal, de absorptie-isotherm. Volgens een latere studie van Derome ea. [15] volstaat dit niet voor een nauwkeurige modellering van sparrenhout. Zij besluiten verder ook dat de waterdamppermeabiliteit afhankelijk is van het vochtgehalte en niet van de relatieve vochtigheid.

1.2.3 Vochttransport in poreuze materialen

Vocht kan op verschillende manieren doorheen of langs een materiaal stromen. Deze worden naargelang de fase en het drijvende mechanisme verder opgesplitst [56]:

Transportmechanisme		**Drijvende kracht**
Damptransport	Dampdiffusie	Dampdruk
	Effusie (moleculaire transport)	Dampdruk
	Oplossingdiffusie	Dampdruk
	Convectie	Totaal drukgradiënt
Vloeibaar transport	Capillaire conductie	Capillaire zuiging
	Oppervlaktediffusie	Relatieve vochtigheid
	Gravitaire stroming	Zwaartekracht
	Hydraulische stroming	Totale drukverschillen
	Electrokinese	Elektrisch veld
	Osmose	Ionen concentratie

Lekkage doorheen een constructie, van zowel vocht als lucht, is moeilijk te kwantificeren en wordt daardoor in sommige modellen nog niet opgenomen. Dit geldt ook voor transport door stroming, elktrokinese en osmose, waarvoor nog geen betrouwbare transportmodellen bestaan en die enkel voorkomen in specifieke gevallen. De belangrijkste mechanismes die we hieronder zullen bespreken zijn waterdampdiffusie en vloeibaar transport door capillaire krachten. Deze mechanismen beïnvloeden elkaar en het is dan ook nodig deze interactie verder te bekijken, dit adhv een voorbeeld weergegeven in figuur 3.



FIGUUR 6 - SCHEMA VAN HET VOCHTTRANSPORT DOORHEEN EEN POREUS, HYGROSCOPISCH BOUWMATERIAAL [56].

In wintercondities is de temperatuur, alsook de dampdruk, hoger langs de binnenzijde van de constructie. Omdat de vochtigheid buiten vaak hoger is, zal het gradiënt van de relatieve vochtigheid in de omkeerde zin verlopen. Als de bouwcomponent droog is, zal de dampdiffusie van binnen naar buiten stromen doorheen de capillairen. Het geabsorbeerde water zal in de poriën blijven zitten door de grote adhesieve krachten. Wanneer de totale vochthoeveelheid stijgt, zal zich een film vormen op de poriënwand, die dikker is langs de buitenzijde vanwege de hogere relatieve vochtigheid. Hoe dikker de film, hoe mobieler de watermoleculen worden, die zich naar de dunnere secties zullen verplaatsen. Dit noemt men oppervlaktediffusie. Wanneer de vochthoeveelheid blijft stijgen, kan dit omgekeerde transportmechanisme er zelfs voor zorgen dat de totale stroom ook omgekeerd wordt.

Deze mechanismen treden op in één porie van een hygroscopisch, capillair-actief materiaal, en bij uitbreiding in het gehele materiaal. Bij andere, niet-hygroscopische of niet-capillair-actieve materialen, treden niet alle effecten op, en zal bv capillair transport zich niet voordoen.

1.2.4 DAMPTRANSPORT

Waterdampdiffusie komt tot stand door een verschil in concentraties in mengsels van gassen of vloeistoffen. Deze wordt ook Fick's diffusie genoemd. Bij poreuze materialen doet dit zich voor wanneer de poriën groot genoeg zijn, en de diffusie kan beschreven worden als dampdiffusie in lucht. Wanneer de poriën zo klein zijn dat er meer botsingen zijn tussen de watermoleculen en de poriënwanden dan tussen de moleculen onderling spreekt men van effusie of Knudsen-transport. In beide gevallen is de dampdruk de drijvende kracht [56],[48].

Om dampdiffusie doorheen een poreus materiaal te beschrijven, wordt de damppermeabiliteit δ_p en de dampdiffusieweerstandsfactor μ ingevoerd. De damppermeabiliteit in een bepaald punt in het materiaal is de verhouding tussen de dichtheid van de dampflux en de dampdruk in dat punt.

$$\delta_p = \frac{g \,.\, d}{p_1 - p_2}$$

g	[kg/(m².s)]	Dampflux
d	[m]	Dikte van de laag
$p_1 - p_2$	[Pa]	Dampdrukverschil over de laag

De dampdiffusieweerstandsfactor μ is de verhouding tussen de diffusiecoëfficiënten van waterdamp in lucht en die van het bouwmateriaal, onafhankelijk van de temperatuur [2]. μ is een waarde die zowel de poriënstructuur als dien's relatie met dampoverdracht binnen en doorheen het materiaal in zich opneemt.

Open, poreuze materialen, zoals minerale wol, hebben een μ-factor dicht tegen 1. Materialen met een hoge μ-factor noemt men dampvertragend of dampdicht. Deze materialen gebruikt men als dampschermen in verschillende bouwcomponenten [32].

Een afgeleide factor hiervan is de dampdiffusiedikte μd of Sd, die voor sommige materialen handiger is in gebruik, bijvoorbeeld voor materiaallagen met een variabele dikte of zeer dunne materialen, zoals dampschermen.

1.2.5 Vloeibaar vochttransport

Een eerste mechanisme is oppervlaktediffusie, waarbij het vocht getransporteerd wordt langs de wanden van de poriën. Doordat de relatieve vochtigheid toeneemt, zal het aantal waterlaagjes dat de poriënwand adsorbeert ook toenemen. De bindingskracht van deze laagjes zal dalen als deze zich verder en verder van de poriënwand bevinden. De mobiliteit van de watermoleculen neemt hierhoor toe, en een vochtgradiënt over het materiaal zal resulteren in transport van deze watermoleculen.

In tegenstelling tot capillair vochttransport kan oppervlaktediffusie reeds optreden onder de kritische vochthoeveelheid w_{cr}, volgens onderzoek van H. Schaschek [74] zelfs rond $\varphi = 30\%$ voor papierproducten.

Een tweede mechanisme van vloeibaar vochttransport dat hier kort besproken wordt, is capillaire conductie. Wanneer een fijnporig materiaal langs één zijde in contact staat met water, dan zal dit materiaal het water opzuigen. Het vochtfront zal evenredig met de vierkantswortel van de tijd in het materiaal opschuiven [48]:

$$x = B\sqrt{t}$$

x	[m]	Penetratiediepte
t	[s]	Tijd
B	[m/s^{0,5}]	Waterpenetratiecoëfficiënt

Ook wanneer het materiaal niet in direct contact staat met water, maar de relatieve vochtigheid hoog genoeg is, kan capillair transport zich voordoen. Hierboven werd vermeld dat dit mechanisme enkel in werking treedt bij vochtgehaltes hoger dan het kritische vochtgehalte ($w \geq w_{cr}$), maar in de praktijk komt dit reeds vroeger voor in micro-capillairen.

Omdat capillaire conductie altijd samengaat met oppervlaktediffusie, wordt deze ook meegerekend in deze formule. Künzel [56] zal deze formules verder uitwerken en de nodige coëfficiënten samenbrengen in de

[2] Künzel verwijst hierbij naar de experimenten door A. Tveit (1966) en R. McLean, G. Galbraith en C. Sanders (1990).

vloeibare conductiecoëfficiënt D_φ. Vloeibaar vochttransport in een poreus bouwmateriaal kan nu beschreven worden door de volgende vereenvoudigde vergelijking:

$$g_w = -D_\varphi \,.\, \nabla\varphi$$

g_w	[kg/(m².s)]	Vloeibare waterflux
D_φ	[kg/m.s]	Vloeibare geleidingscoëfficiënt
φ	[-]	Relatieve vochtigheid

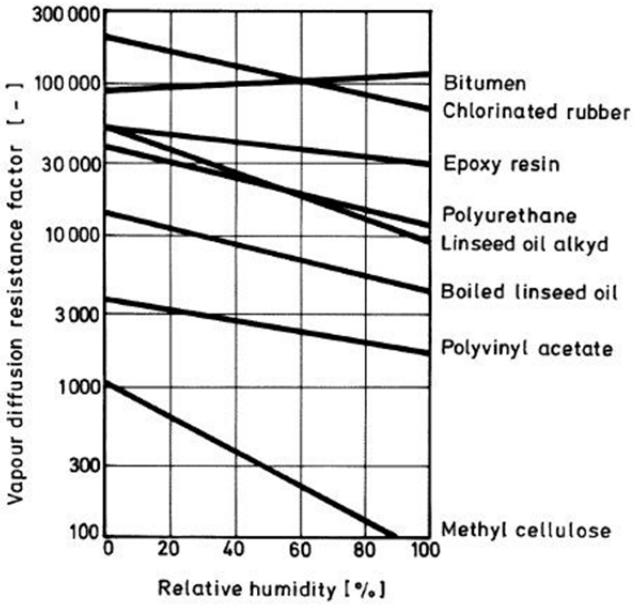
1.2.6 Vochttransport in oververzadigde materialen

De relatieve vochtigheid is hier minstens 100%, wat betekent dat de capillaire zuiging zo goed als 0 is, en er zich dus geen capillair vochttransport kan voordoen. Alleen waneer de relatieve vochtigheid op een bepaalde plaats in het materiaal daalt, ontwikkelt zich een potentiaal dat het vochttransport in werking kan doen treden. Toch kan er vochtransport optreden, vooral in materialen met grote poriën, dit door het effect van de zwaartekracht (WUFI zal hier echter geen rekening mee houden). Onder invloed van een temperatuursgradiënt kan er ook dampdiffusie optreden doorheen het materiaal, afhankelijk van de mate waarin de poriën reeds gevuld zijn. Ook een verschil in dampdruk, wanneer de uitwisseling verhinderd wordt, kan het poriënwater in beweging zetten. Deze fenomen zijn zeer moeilijk op te nemen in een model.

1.2.7 Oplossingsdiffusie

Deze term wordt gebruikt voor vochttransport in organische polymeren, zoals afdichtingen, dampschermen en andere folies. In tegenstelling tot minerale bouwmaterialen en de meeste isolatiematerialen, die bestaan uit een starre poriënstructuur, creëert het water in de polymeren zijn eigen poriën en holtes door zich vast te hechten aan de macromolecules, wat ervoor zorgt dat het polymeer zwelt.

De oplosbaarheid van het polymeer voor waterdamp hangt af van de keten macromolecules, die polair of apolair kunnen zijn. De factor neemt ook exponentieel af met de temperatuur. De oplossingsdiffusiecoëfficiënt is afhankelijk van de structuur en de graad van cross-linking van het polymeer.



FIGUUR 7 - VOCHTAFHANKELIJKHEID VAN DE DIFFUSIEWEERSTANDSFACTOR VOOR VERSCHILLENDE BOUWMATERIALEN [56].

1.2.8 VOCHTTRANSPORT ONDER HET VRIESPUNT

Onder het vriespunt kan ijsvorming in materialen met een hoog vochtgehalte dampdiffusie verhinderen. De diffusieweerstandsfactor zal weinig beïnvloedt worden door ijsvorming wanneer de poriën voor 60% of minder gevuld zijn. Het effect bij vloeibaar watertransport zal groter zijn. Onder 0°C is er geen capillaire zuiging meer. In de kleinere poriën ligt de vriestemperatuur lager dan in de grote poriën vanwege de capillaire druk. De transportsnelheid in de grotere poriën zal dus wel vertragen, en het vochttransport van het materiaal beïnvloeden.

1.3 BEPALEN VAN DE HYGRISCHE MATERIAALEIGENSCHAPPEN

Het toepassen van materialen in een bouwconstructie en het simuleren van de vochthuishouding vereist bepaalde hygrische eigenschappen van de gebruikte materialen. Door de jaren heen zijn verschillende testmethodes opgesteld om deze karakteristieken te bepalen. Deze zijn opgenomen in een aantal normen, zowel per land als internationaal. Vele experimenten zijn reeds uitgevoerd en de resultaten daarvan kunnen dan ook gebruikt worden in verder onderzoek. IEA Annex 24 bundelt verschillende materiaaleigenschappen van hedendaagse bouwmaterialen uit verschillende landen [51]. Niet alle materialen zijn natuurlijk exact gelijk en voor sommige studies kan het dan ook nodig zijn extra proeven uit te voeren.

Voor het uitvoeren van een hygrothermische simulatie in WUFI zijn een minimum aantal materiaaleigenschappen nodig [45]:

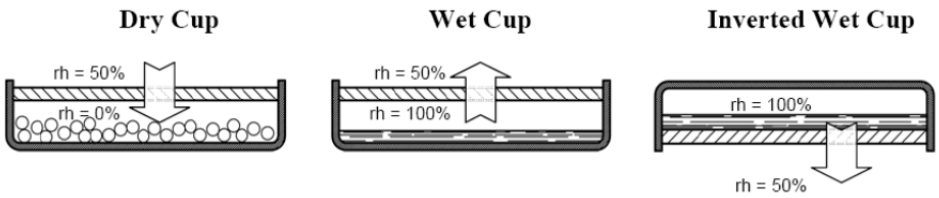
Materiaaleigenschap	**Symbool**	**Eenheid**	**Nodig?**	**Procedure**
Massadichtheid	ρ	[kg/m³]	Altijd	/
Porositeit	ε	[m³/m³]	Altijd	Bepaling adhv helium-pyknometer
Soortelijke warmte	c	[J/kgK]	Altijd	EN ISO 11357
Thermische geleidbaarheid, droog, 10°C	λ	[W/mK]	Altijd	Hete-plaatmethode of warmtefluxmeter EN ISO 12664 EN ISO 12667
Waterdampdiffusieweerstand	μ	[-]	Altijd	Cup-methode EN ISO 12572
Vochtopslagfunctie	w - φ	[kg/m³]	Hygroscopische materialen (voor niet-hygroscopische materialen zal WUFI zelf een artificiële functie opstellen)	EN ISO 12571
Vloeibare transportcoëfficiënt, suctie	D_{ws}	[m²/s]	Capillair-actieve materialen	EN ISO 15148
Vloeibare transportcoëfficiënt, herverdeling	D_{ww}	[m²/s]	Capillair-actieve materialen	/
Waterdampdiffusieweerstand, vochtafhankelijk	μ	[-]	Polymeren, met oplossingsdiffusie	EN ISO 12572
Thermische geleidbaarheid, vochtafhankelijk	λ	[W/mK]	Altijd, enkel voor membranen en andere dunne lagen niet	EN ISO 12664
Thermische geleidbaarheid, temperatuursafhankelijk	λ	[W/mK]	Vooral isolatiematerialen	EN ISO 12664 EN ISO 12667
Enthalpie, temperatuurafhankelijk	H	[J/kg]	Faseveranderende materialen	EN ISO 11357

1.3.1 De hygroscopische curve

De sorptie-isotherm kan eenvoudig bepaald worden door een ovendroog materiaalspecimen in een omgeving met constante temperatuur en constante relatieve vochtigheid te plaatsen. Na verloop van tijd zal het proefstuk een evenwichtsvochtgehalte bereiken. Dit kan dan bepaald worden door de vochthoeveelheid in massa uit te drukken tegenover de massa van het originele testmateriaal. Deze methode is voor de meest materialen toepasbaar tot $\varphi = 95\%$. Hierna zal capillair vochttransport een grote invloed hebben op het resultaat en is het beter over te schakelen naar een ander proefmethode, de drukplaatmeting (pressure plate measurement). Hierbij wordt door een verhoogde luchtdruk water uit een met water verzadigd proefstuk geperst totdat er zich een evenwicht instelt tussen de capillaire zuiging en opgelegde luchtdruk. Aan de onderkant staat de plaat in contact met zuiver water onder een constante druk, dikwijls gelijk aan de atmosferische druk. Boven de plaat wordt met behulp van een compressor een constante, verhoogde luchtdruk aangehouden. Het watergehalte in het proefstuk zal afnemen tot de capillaire druk in het proefstuk gelijk is aan het drukverschil over de plaat. Door wegen van het proefstuk kan men het watergehalte aan de capillaire zuiging of relatieve vochtigheid koppelen. Vervolgens kan de druk verhoogd worden totdat er zich een nieuw evenwicht instelt [20].

1.3.2 Waterdamppermeabiliteit

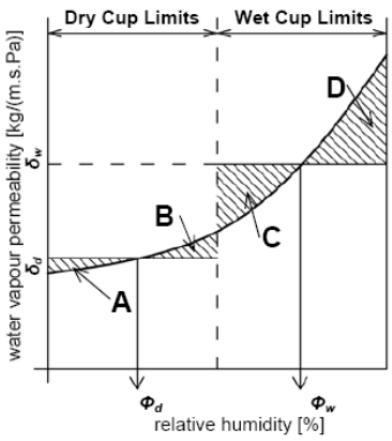
Deze materiaalfactor kan op verschillende manieren bepaald worden. De cuptests zijn de eenvoudigste en meest verspreide techniek; deze zullen we hier verder toelichten. De methode werd voor het eerst gebruikt in 1954 en wordt nu beschreven in verschillende normen, zoals ASTM 96/E en EN ISO 12572 [12]. Er zijn 3 cuptest-methodes, ieder genaamd naar de toegepaste relatieve vochtigheid op het proefstuk. Zo is er de dry-cup (desiccant method), wet-cup (water method) en de omgekeerde wet-cup (inverted water method).



FIGUUR 5 - DE 3 MOGELIJKE CUP TEST-OPSTELLINGEN [76].

Procedure	Naam methode	Temperatuur (°C)	RV (%) langs de twee zijden van het specimen	
			Droog	Nat
A	Dry-cup	23	0	50
B		23	0	80
C	Wet-cup	23	50	93
D		38	0	93

In bovenstaande tabel staan enkele randvoorwaarden die in EN ISO 12572 zijn opgenomen. De resultaten geven aan wat de damppermeabiliteit is voor een materiaal geplaatst in een omgeving met lagere of hogere relatieve vochtigheid. De relatie tussen de dry-cup en wet-cup wordt door Chang & Hutcheon [13] weergegeven in een figuur.



FIGUUR 6 - DAMPPERMEABILITEIT VOLGENS CUP-TESTS [13].

De bekomen μ-waarde is afhankelijk van het gemiddelde van de over de twee zijden aanwezige relatieve vochtigheid, en dus meestal verschillend voor de heersende relatieve vochtigheden in de praktijk. Volgens Kumuran [52] is deze wijze niet gedetaileerd genoeg, en is een meer verfijnde techniek nodig om damppermeabiliteit over het volledige verloop van de relatieve vochtigheid te kennen en zo de nodige modelleringen te kunnen maken. Hij beschrijft deze zelf verder in detail [52].

De wet-cup methode wordt toegepast wanneer dit bouwmateriaal zich in de praktijk bevindt in een omgeving waar de relatieve vochtigheid meestal hoger is dan 50%. Een relatieve vochtigheid dicht bij de 100% is niet aan te raden, omdat hierbij condensatie op het materiaal kan optreden (93% is een veilige waarde). De temperatuur is langs beide zijden constant.

De damp zal doorheen het materiaal getransporteerd worden volgens:

$$g_v = \frac{\delta_a \,.\, \Delta p}{\mu \,.\, d}$$

g_v	[kg/(m².s)]	Dampflux doorheen het proefstuk
δ_a	[kg/(m.s.Pa)]	Damppermeabiliteit van lucht
Δp	[Pa]	Dampdrukverschil

Aan de hand van periodieke weging van het proefstuk kan de dampflux bepaald worden en zo ook de dampdiffusieweerstandsfactor μ.

$$g_v = \frac{\Delta m}{\Delta t . S}$$

Δm	[kg]	Massa toe- of afname
Δt	[s]	Tijdsverschil tussen twee metingen
S	[m²]	Oppervlakte van het proefstuk

$$\mu = \frac{\Delta t . S . \Delta p . \delta_a}{\Delta m . d}$$

Het partieel drukverschil Δp wordt volgens ISO 12572 [12] bepaald door volgende formule:

$$\Delta p = \Delta\varphi . 610{,}5 . e^{\frac{17{,}269+\theta}{237{,}3+\theta}}$$

$\Delta\varphi$	[-]	Verschil in RV tussen beide zijden van het proefstuk
θ	[°C]	Temperatuur gedurende proef

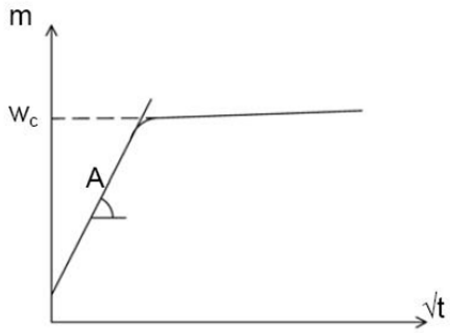
De dry-cup test loopt volgens dezelfde procedure, enkel onder andere omstandigheden. Om de relatieve vochtigheid tot 0% te krijgen wordt een droogmiddel gebruikt, meestal Calciumchloride of een Silica-gel, die geactiveerd worden door een temperatuur van 200°C. Een alternatief is Magnesiumperchloraat. Om in de praktijk de relatieve vochtigheid onder 3% te houden, dient het vochtgehalte in het Calciumchloride onder 10% en in de Silica-gel onder 4% te blijven na het beëindigen van de test.

De omgekeerde wet-cup test verloopt ook volgens dezelfde procedure. Enkel zal het proefstuk hier in contact staan met het water. Dit leidt meestal tot een hoger waterdamptransport, omdat hier ook capillair vochttransport optreedt [20],[76].

1.3.3 Vloeibare vochttransport: waterabsorptiecoëfficiënt

De waterabsorptie wordt bepaald door gedeeltelijke onderdompeling, en volledig beschreven in *"EN ISO 15148: Hygrothermische prestaties van bouwmaterialen en –producten: Bepaling van de waterabsorptie door gedeeltelijke onderdompeling"* [8]. Deze eigenschap beschrijft de capillaire zuiging van een materiaal, opgedeeld in het capillair vochtgehalte w_c en de absorptiecoëfficiënt A. De methode bestaat erin enkele proefmonsters in water te plaatsen en de evolutie van de massa van het proefstuk te volgen in functie van de tijd.

Uit de massa van het proefstuk wordt m bepaald, de opgezogen hoeveelheid water per contactoppervlak . Als deze in een grafiek uitgezet wordt als functie van de vierkantswortel van tijd t, vindt men een lineair verband.



FIGUUR 7 - VERLOOP CAPILLAIRE OPZUIGING [69].

$$m = A\sqrt{t}$$

m	[kg/m²]	Opgezogen hoeveelheid water per contactoppervlakte-eenheid
A	[kg/m².√s]	Waterabsorptie-coëfficiënt
t	[s]	Tijd

Het capillair vochtgehalte is de hoeveelheid water in het monster op het ogenblik dat het vochtfront de andere zijde van het monster bereikt. Hoe hoger w_c, hoe meer water in de poriën opgezogen kan worden en dus hoe poreuzer het materiaal is. Vaak wordt lucht ingesloten in de poriën van het materiaal, waardoor na het knikpunt nog een secundaire opzuiging mogelijk is, waarbij de resterende lege poriën gevuld worden met water. Het capillair vochtgehalte blijft wel steeds kleiner dan het verzadigingsvochtgehalte. Hoe groter de waterabsorptie-coëfficiënt, hoe sneller het water opgezogen wordt [8],[16].

Aan de hand van deze eenvoudig te bepalen eigenschappen, kunnen we verder de vloeibare transportcoëfficiënt bepalen. Krus en Künzel stellen de volgende vergelijking voor [47],[48]:

$$D_w = \frac{\pi}{4}\left(\frac{A}{w_c}\right)^2$$

D_w	[m²/s]	Vloeibare transportcoëfficiënt
A	[kg/m².√s]	Waterabsorptiecoëfficiënt
w_c	[kg/m³]	Capillair vochtgehalte

Kumaran geeft aan dat dit een goede benadering is van de waarden bepaald door gesofisticeerd onderzoek. Deze waarde geeft de omvang aan van het vloeibaar vochttransport [50]. In WUFI wordt verder onderscheid gemaakt tussen een coëfficiënt voor suctie en redistributie (D_{ws} en D_{ww}).

1.4 Thermische eigenschappen

1.4.1 Warmteopslag

De hoeveelheid warmte opgeslagen in een materiaal wordt onder isobare condities beschreven aan de hand van de enthalpie H. De soortelijke enthalpie van een bouwmateriaal is lineair evenredig met de temperatuur, met als referentiepunt 0°C:

$$H_d = \rho_d \, c_d \, \theta$$

H_d	[J/m³]	Soortelijke enthalpie van het droog materiaal
ρ_d	[kg/m³]	Massadichtheid droog materiaal
c_d	[J/kgK]	Soortelijke warmte van het droog bouwmateriaal

Voor een vochtig bouwmateriaal dienen we hierbij een extra enthalpie op te tellen, voor het vocht opgenomen in het bouwmateriaal.

$$H = H_d + H_w$$

Die enthalpie is afhankelijk van de aggregatietoestand waarin het vocht zich bevindt, wat moeilijk exact te bepalen is binnen de poriënstructuur van het materiaal. Deze bepaling kan dus enkel gebeuren wanneer de poriënradius-distributie of de hygrische curve van het materiaal gekend is. De soortelijke enthalpie van het vocht in een bouwmateriaal kan benaderd worden door:

$$H_w = \left[(w - w_e)c_w + w_e c_e - h_e \frac{dw_e}{d\theta}\right].\theta$$

H_w	[J/m³]	Soortelijke enthalpie van het vocht in het materiaal
w	[kg/m³]	Totale vochthoeveelheid
w_e	[kg/m³]	Hoeveelheid bevroren water
c_w	[J/kgK]	Soortelijke warmte van vloeibaar water
c_e	[J/kgK]	Soortelijke warmte van ijs
h_e	[J/kg]	Soortelijke smeltwarmte
θ	[°C]	Temperatuur

1.4.2 WARMTETRANSPORT

Er zijn 4 mogelijke vormen van warmtetransport: geleiding, convectie, straling en transport van latente warmte.

Warmtegeleiding vindt plaatst door botsingen tussen atomen of moleculen, waarbij kinetische energie wordt doorgegeven van een plaats met hogere temperatuur naar een plaats met lagere temperatuur. Hiervoor is dus steeds een medium nodig. De eerste wet van Fourier beschrijft de warmteflux in functie van het temperatuursgradiënt [20]:

$$q = -\lambda \nabla T$$

q	[W/m²]	Warmteflux door geleiding
λ	[W/mK]	Warmtegeleidingscoëfficient
T	[K]	Temperatuuur

De λ-waarde van stilstaande lucht bedraagt ongeveer 0,024 W/mK bij 20°C. De warmtegeleidingscoëfficiënt van de meeste vaste stoffen ligt beduidend hoger zodat klassieke isolatiematerialen er op gericht zijn stilstaande lucht in te sluiten in een matrix van vaste stof. Water heeft een λ-waarde van ongeveer 0,6 W/mK, zodat ook bij absorptie van water de λ-waarde van vele poreuse (isolatie)materialen zal toenemen [56],[20].

Convectie is een moeilijk te bepalen parameter binnen het verdere onderzoek, maar zal een niet te verwaarlozen invloed hebben op het eidresultaat. Convectie kan zich zowel voordoen langs een oppervlak als binnen een constructie zelf.

Alle vaste en vloeibare materialen zenden aan hun oppervlak elektromagnetische straling uit waarvan de gemiddelde golflengte afneemt met stijgende temperatuur en de uitgestraalde energiedichtheid evenredig is met de vierde macht van de absolute temperatuur. De verhouding van de warmtestraling die geabsorbeerd wordt op het totaal van de invallende warmtestraling noemt men de absorptiefactor α. Deze is voor elke golflengte gelijk aan de emissiefactor ε, die de verhouding geeft tussen de, bij een welbepaalde temperatuur, uitgezonden warmtestralingsdichtheid en de uitgezonden warmtestralingsdichtheid geëmitteerd door een theoretische zwarte straler bij dezelfde temperatuur. De hoeveelheid gereflecteerde straling op de totale hoeveelheid invallende straling noemt men de reflectiefactor ρ. Voor een bepaalde golflengte geldt voor volledig opake materialen ε = 1 − ρ [20]. We beschrijven de straling volgens:

$$q = \epsilon . \sigma . \mathrm{F}\ (T_s - T_o)^4$$

q	[W/m²]	Warmteflux door straling
ϵ	[-]	Emissiefactor van het oppervlak
σ	[W/(m²K^4]	Boltzmann constante
F	[-]	Zichtfactor
T_s	[K]	Oppervlaktetemperatuur
T_o	[K]	Omgevingstemperatuur

De kortgolvige straling kan opgedeeld worden in directe straling die rechtsreeks van de zon het dakoppervlak bereikt en de diffuse straling die gereflecteerd is in de atmosfeer of op omliggende oppervlakken. Het diffuse licht kan afhankelijk van de geometrie van het oppervlak dat voor de schaduw zorgt van helemaal niet tot praktisch volledig gehinderd worden bij het bereiken van het dakoppervlak. Als gevolg van de kortgolvige straling kan in Vlaanderen de temperatuur van niet-beschaduwde zwarte dakoppervlakken oplopen tot meer dan 70°C op zonnige, windluwe dagen, maar ook bij beschaduwde daken kan het diffuse zonlicht soms tot oppervlaktetemperaturen van 50°C en meer leiden [20].

De latente warmte is een hoeveelheid energie die nodig is om een fase-verandering te veroorzaken in een bepaald materiaal. Transport van latente warmte hangt samen met transport van een medium, vocht in dit geval. Deze hoeveelheid energie kan aanzienlijk groot zijn en is daarom niet te verwaarlozen.

1.5 Modelleringstechnieken

1.5.1 Inleiding

In de praktijk is er een steeds grotere vraag naar rekenmodellen om warmte-, lucht- en vochttransport op korte en lange termijn te voorspellen binnen bouwconstructies. Eerst wordt de Glaser-methode kort toegelicht, die algemeen gebruikt wordt om vochtaccumulatie in een bouwconstructie te bekijken. Deze methode is conservatief en vrij onnauwkeurig voor zware constructies. Door de vele vorderingen die gemaakt zijn in het modelleren van gecombineerd warmte- en vochttransport door Künzel [56], Karagiozis[40], Hens[32], en anderen, is het mogelijk meer gesofisticeerde hygrothermische computermodellen op te stellen. We lichten WUFI kort toe, dat verder in deze thesis gebruikt zal worden om bepaalde bouwconstructies te simuleren.

1.5.2 De Glasermethode

Deze eenvoudige rekenmethode werd ontworpen om de hoeveelheid interstitiële condensatie gevormd gedurende een koude winter, en de theoretische droging in een koude zomer te bepalen. Hierbij wordt uitgegaan van strenge, stationaire condities. Wanneer de hoeveelheid condensatie in de winter geen bepaalde limiet overschreidt en als de theoretische droging in de zomer groter is dan de vochtopname, wordt de constructie als veilig beschouwd.

In de Glaser-methode wordt geen rekening gehouden met hygroscopische zuiging, noch met vloeibaar vochttransport. Hierdoor is de methode beperkt tot lichtere bouwconstructies. De opzet van deze methode is dus niet een realistische simulatie te geven van het werkelijke vochtverloop in de constructie, maar enkel een methode om het condensatierisico eenvoudig te bepalen.

In EN ISO 13788 [6] wordt de berekeningsmethode verder uiteengezet. Eén van de parameters zijn de klimatologische maandgemiddeldes. Het is belangrijk de juiste data hiervoor te gebruiken. In EN ISO 15927, *Hygrothermal performance of buidings – Calculation and presentation of climatic data* [9], wordt verder toegelicht hoe deze data te gebruiken en een 'Referentie jaar' op te stellen.

Verder worden nog enkele beperkingen en mogelijke fouten aangegeven door vereenvoudigingen, zoals [6]:

- Eén-dimensionaal vochttransport wordt aangenomen.
- Convectie binnen de constructie kan de vochtbalans sterk beïnvloeden.
- Constante materiaaleigenschappen zijn een benadering.
- De thermische geleiding is afhankelijk van het vochtgehalte, en warmte wordt afgegeven/opgenomen door condensatie/verdamping. Dit zal zowel het warmte- als vochtverloop doorheen de constructie beïnvloeden.
- De effecten van straling worden genegeerd.
- Geen zuiging of vloeibaar transport.
- Geen vochtopslagtermen: berekening essentieel statisch.
- Geen rekening gehouden met constructievocht, zomercondensatie, regenbelasting, opstijgend vocht,...

Een vergelijkend voorbeeld door Künzel [57] toont aan dat zowel de Glaser-methode als de modernere berekingen door WUFI tot een gelijkaardig resultaat komen voor de intersistiële condensatie in een dakconstructie. De simulatie laat wel toe een meer realistisch beeld te vormen van het vochtgedrag in de bouwconstructie, zo wordt de invloed van initieel bouwvocht, straling, de invloed van vocht op warmtetransport,... meegenomen in het model. Vooral het initieel bouwvocht in de constructie is van groter

belang geworden, nu het tijdsschema voor het optrekken van een gebouw altijd maar strakker werd in de voorbije jaren.

1.5.3 WUFI

Verder in dit onderzoek zal gebruik gemaakt worden van het software-pakket WUFI. WUFI (Wärme- und Feuchte Instatiionär) [56] werd ontwikkeld aan de Fraunhofer Institute for Building Physics IBP in Holzkirchen. Verder onderzoek werd gevoerd in samenwerking met het Oak Ridge National Laboratory ORNL in Tennesse.

GECOMBINEERD WARMTE- EN VOCHTTRANSPORT

De hierboven aangehaalde fenomen (opslag- en transportmechanismen van warmte en vocht) dienen nu samen te komen in één vergelijkingssysteem waaruit het vochtgedrag van een meerlagige bouwconstructie kan berekend worden onder natuurlijke klimatologische randvoorwaarden. Künzel [56] neemt als potentialen: de relatieve vochtigheid φ en de temperatuur θ. De dampdruk en capillaire zuiging worden dus omgezet naar deze grootheid.

De wet van behoud geldt zowel voor warmte als voor vocht. Voor warmte leidt dit tot de volgende vergelijking (uitgedrukt in enthalpie):

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla . q + S_h$$

H	[J/m³]	Totale enthalpie
q	[W/m²]	Warmtefluxdensiteit
S_h	[W/m³]	Warmtebron of –afname

Waarbij de totale enthalpie bestaat uit de enthalpie van het droge materiaal en de enthalpie van het opgenomen water (zie hoger). De enthalpiestromen door vochttransport en faseveranderingen kunnen in rekening gebracht worden door de warmtebronterm in de vergelijking. In praktijk is enkel de dampdiffusie met gelijktijdige faseverandering van belang. Deze factor in de vergelijking kan geschreven worden als:

$$S_h = -h_v \nabla . g_v$$

S_h	[J/m³s]	Warmtebron of –afname door condensatie/verdamping
h_v	[J/kg]	Latente warmte
g_v	[kg/m²s]	Dampdiffusie fluxdensiteit

De dampdiffusie fluxdensiteit wordt berekend aan de hand van de vochtbalans. Deze kan geschreven worden, in analogie met de warmtebalans, volgens:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla . (g_w + g_v) + S_w$$

w	[kg/m³]	Vochtgehalte van het bouwmateriaal
g_w	[kg/m²s]	Vloeibaar transport fluxdensiteit
g_v	[kg/m²s]	Dampdiffusie fluxdensiteit
S_w	[kg/m³s]	Vochtbron of –afname

Dampdiffusie en vloeibaar vochttransport werden hierboven beschreven. Künzel [56] neemt de extra factor S_w niet verder in rekening. De vergelijkingen van de warmtebalans en de vochtbalans zijn sterk afhankelijk van elkaar. Zij kunnen enkel samen opgelost worden. Het aantal variabelen moet hierbij beperkt blijven tot 2 : De temperatuur en relatieve vochtigheid. Voor gecombineerd warmte- en vochttransport bekomt men de volgende vergelijkingen:

$$\frac{dH}{d\theta} \cdot \frac{\partial\theta}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla\theta) + h_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla(\varphi\, p_{sat}))$$

$$\frac{dw}{d\varphi} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial t} = \nabla \cdot \left(D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \nabla(\varphi\, p_{sat})\right)$$

$\frac{dH}{d\theta}$	[J/m³K]	Warmteopslagcapaciteit van een vochtig bouwmateriaal
$\frac{dw}{d\varphi}$	[kg/m³]	Vochtopslagcapaciteit van een bouwmateriaal

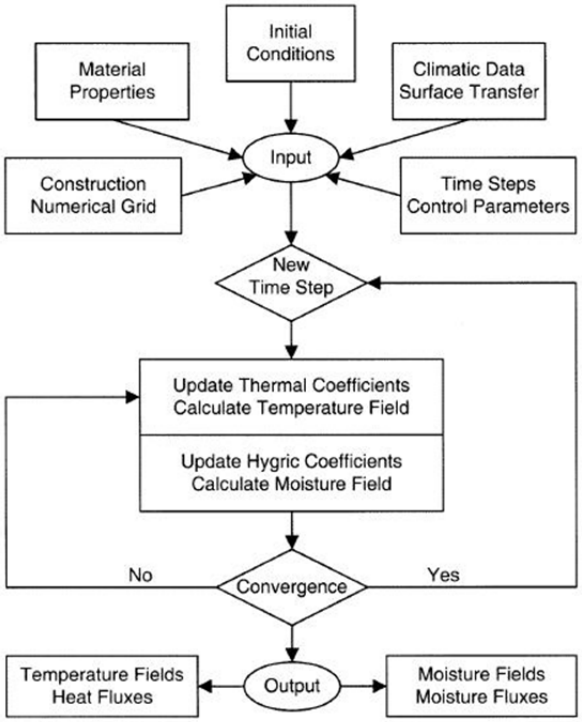
De verzadigingsdampdruk kan berekend worden aan de hand van een empirische verhouding, als functie van de temperatuur [18]:

$$p_{sat} = 611 \cdot \exp\left(\frac{a \cdot \theta}{\theta_0 + \theta}\right)$$

$a = 22{,}44 \qquad \theta_0 = 272{,}44\ °C \quad \theta < 0°C$
$a = 17{,}08 \qquad \theta_0 = 234{,}18\ °C \quad \theta \geq 0°C$

Deze vergelijkingen worden verder omgezet in Carthesiaanse coördinaten, om tweedimensionale berekingen mogelijk te maken, en verder opgedeeld in een matrix volgens de gebruikte bouwmaterialen [56].

WERKINGSSCHEMA WUFI



FIGUUR 8 - WERKINGSSCHEMA WUFI [56].

Om de berekingen te kunnen maken, moeten eerst en vooral de nodige inputdata gegeven worden zoals aangegeven in het schema. Wanneer dit correct gebeurt is, worden de initiële verdelingen van vocht en warmte berekend (deze kunnen ook worden opgegeven). Hieruit worden de temperatuur- en vochtvelden berekend per tijdstap. Bij iedere nieuwe tijdstap worden de gekoppelde warmte- en vochtbalansvergelijkingen opgelost. Voor elke oplossing van de warmtebalansvergelijking worden alle vocht- en temperatuursafhankelijke

opslag- en transportcoëfficiënten aangepast. Hetzelfde geldt voor de bereking van de hygrische coëfficiënten voor de vochtbalans. De bekomen vocht- en temperatuursvelden kunnen nu opnieuw dienen als beginconditities voor de volgende tijdsstap.

De nauwkeurigheid van de simulatie is sterk afhankelijk van de beschikbaarheid van consistente materiaaleigenschappen. Het gebrek aan betrouwbare eigenschappen is een van de grote problemen voor een grote toepassing van het simulatiepakket. Verschillende databanken worden hiervoor opgenomen in het programma. De minimale eigenschappen per bouwmateriaal zijn de specifieke warmtecapaciteit c, thermische geleidbaarheid λ, massadichtheid ρ, porositeit ε en de dampdiffusieweerstandsfactor μ [42].

Beperkingen en onnauwkeurigheden

De nauwkeurigheid van de numerieke oplossing is afhankelijk van de keuze van begrenzingscriteria, lengte van de tijdstoename en de netwerkgrootte van het grid, zo geeft Künzel [56] aan. Kleine veranderingen in relatieve vochtigheid kunnen zorgen voor grote verschuivingen in het vochtgehalte van een materiaal. Om de correcte keuze van begrenzingscriteria, lengte van tijdstoename en netwerkgrootte te controleren stelt hij voor de volgende test uit te voeren, toegevoegd aan een geloofwaardigheidscontrole:

a. Herhaal de volledige berekening waarbij de begrenzingscriteria gereduceerd worden met een factor 10 en de tijdstoename en netwerkgrootte met een factor 2. Vergelijk deze resultaten met de eerdere berekeningen.

b. Vergelijk de geaccumuleerde vochtstromen langs de randen van de bouwconstructie met het verschil in vochtgehalte in de constructie aan het einde en het begin van de berekeningen.

Wanneer het verschil tussen de resultaten van tests a en b verwaarloosbaar zijn, kan de oplossing als aannemelijk beschouwd worden. Wanneer dit niet het geval is voor a, moeten de parameters opnieuw ingesteld worden. Als de discrepanties in test b te hoog zijn, kan dit veroorzaakt worden door afrondfouten in het rekenmodel. In dat geval is een hogere precisie binnen de berekeningen nodig.

Aan de hand van verschillende experimenten wordt de geloofwaardigheid en nauwkeurigheid van het simulatiemodel verder onderzocht. Dit zowel op het gebied van materiaalparameters, klimaatdata, oppervlakteparameters,... Ook de straling op/van een oppervlak is een belangrijke parameter. WUFI brengt deze straling in rekening door een bronterm op de buitenste gridelementen te voorzien, die zowel warmteopname als –verlies beschouwd. Experimentele validatie [58] toont een goede overeenkomst, maar toch ook een sterke gevoeligheid aan veranderingen in de omgevingscondities.

2. GEVOLGEN VAN VOCHT

2.1 INLEIDING

Vocht in bouwconstructies is een veel voorkomend probleem. Ondanks dat de meeste constructies in staat zijn een bepaalde hoeveelheid vocht te bufferen, is 70% van de schadegevallen aan vocht te wijten, volgens Hens [30]. De gevolgen kunnen sterk uiteenlopen, van schimmelgroei en gezondheidsproblemen tot een lagere thermische weerstand van isolatiematerialen. Om deze situatie te vermijden, zijn verschillende modellen en normen opgesteld om deze situaties onder controle te houden, want er zal altijd een kleine hoeveelheid vocht optreden in bouwmaterialen.

Enkele gevolgen van vocht:

- Corrosie
- Biologische aantasting
- Afname van sterkte en stijfheid van hout
- Hygrische vervormingen
- Verhoogde warmteverliezen
- Vorstschade
- Gezondheidsproblemen

Veel van deze gevolgen worden pas opgemerkt wanneer het kwaad al lang geschied is(bv. schimmelgroei in het dak) en de schade bijna niet meer te herstellen.

2.2 CONDENSATIE

In de norm EN ISO 13788 [6] wordt de berekeningsmethode opgenomen om de jaarlijkse vochtbalans van een bouwconstructie te bepalen. Deze methode is zeer vereenvoudigd, en kan dus niet als een nauwkeurige bepaling beschouwd worden. Vele factoren, zoals het initieel vochtgehalte van een materiaal, worden niet mee opgenomen.

Per maand wordt aan de hand van de gemiddelde klimaatsomstandigheden bepaald of er al dan niet condesatie of verdamping optreedt. De geaccumuleerde hoeveelheid condensaat mag de mogelijke verdamping over de lengte van 12 maanden niet overstijgen. Deze condities zijn ééndimensionaal en stationair gedurende een bepaalde maand. Luchttransport doorheen de constructie wordt niet mee opgenomen [6].

2.2.1 VOCHTGEHALTE IN MATERIALEN

Sommige bouwmaterialen, zoals hout en sommige thermische isolaties, kunnen een bepaald vochtgehalte opnemen zonder optredende schadefenomenen. Voor hout en houtproducten dient een vochtgehalte boven het saturatiepunt langer dan één week vermeden worden. Het vezelverzadigingspunt voor vast hout wordt op een vochtgehalte van 30 M% genomen. Voor composiete houtproducten zoals OSB (Oriented Strand Board), is dit veelal lager, rond 20-25 M%. Voor hout en houtproducten in bouwconstructies wordt het evenwichtsvochtgehalte van deze materialen onder 18 M% gehouden, om het gebruik van deze constructie niet te bedreigen [76].

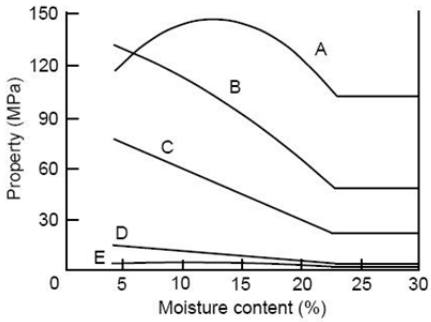
Bij thermische isolatie dienen de globale thermische eigenschappen van het materiaal te voldoen. De thermische geleiding is afhankelijk van het vochtgehalte in het materiaal, het is dus nodig dit te beperken binnen een bouwconstructie. Een isolatiemateriaal met thermische eigenschappen tot 80% van zijn oorspronkelijke droge toestand, wordt als nat en onaanvaardbaar beschouwd. Onderstaande tabel geeft enkele evenwichtsvochtgehaltes van isolatiematerialen voor daken [82].

	Evenwichtsvochtgehalte [M%(kg/kg)]		Vochtgehalte [M%(kg/kg)] isolatiecapaciteit gedaald tot 80%
Isolatiemateriaal	45% RV	90% RV	
Cellulair glas	0,1	0,2	23
EPS (16 kg/m³)	1,9	2,0	383
XPS	0,5	0,8	185
Vezelglas	0,6	1,1	42
Perliet	1,7	5,0	17
Uretaan	2,0	6,0	262
Cellulose	5,0	16,0	84

2.3 STERKTE-EIGENSCHAPPEN EN HYGRISCHE VERVORMINGEN

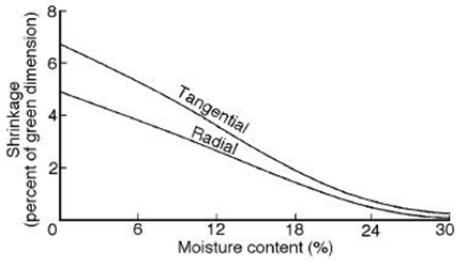
Het vochtgehalte in hout heeft een invloed op de verschillende sterkte-eigenschappen. Door de toename van het vochtgehalte zwelt de celwand, waardoor er minder celwandmaterie per oppervlakte-eenheid overblijft. Ook treedt er een verzwakking van de waterstofverbindingen op, die de celwand bijeenhouden. Onder het vezelverzadigingspunt worden de sterkte en elasticiteitsmodulus kleiner, naarmate het vochtgehalte stijgt. Per M% vochttoename daalt de druk- en treksterkte respectievelijk met 5% en 2,5%. De elasticiteitsmodulus daalt ongeveer iets meer dan 1%. Eens het verzadigingspunt bereikt is, heeft het vochtgehalte vrijwel geen effect meer op de sterkte en stijfheid [75].

De sterkte van hout is ook afhankelijk van de temperatuur, maar niet in dergelijke mate als het vochtgehalte. Bij een daling/stijging neemt de sterkte respectievelijk toe/af.



FIGUUR 9 - INVLOED VAN HET VOCHTGEHALTE OP DE STERKTE-EIG. VAN HOUT [75]. A, TREK EVENWIJDIG; B, BUIGING; C, DRUK EVENWIJDIG; D, DRUK LOODRECHT; E, TREK LOODRECHT.

Een ander aspect is de vormverandering van de gebruikte materialen. De meeste materialen zullen uitzetten wanneer het vochtgehalte toeneemt. Bij organische bouwmaterialen (zoals hout) kan deze vormverandering zeer belangrijk worden, wanneer er scheuren ontstaan en de luchtdichtheid van het materiaal hierdoor daalt [46]. Voor waarden tussen 5 en 20 M% (voorkomend in platte daken) kan men aannemen dat het verband lineair verloopt tussen de afmetingsveranderingen en het vochtgehalte.



FIGUUR 10 - VERBAND TUSSEN VORMVERANDERING EN VOCHTGEHALTE [75].

2.4 Corrosie

Metalen verbindingselementen of meetinstrumenten in daken kunnen worden aangetast door corrosie. Hiervoor is zuurstof en vocht nodig, de relatieve vochtigheid aan het metaaloppervlak hoeft zelfs niet op te lopen tot 100%. De corrosiesnelheid zal stijgen met toenemend vochtgehalte, maar ook chemische stoffen zoals NO_x ,Cl_2 en H_2S kunnen het corrosieproces versnellen. IEA Annex 24 gaat er vanuit dat er geen corrosie optreedt bij een relatieve vochtigheid lager dan 60% [51]. ASHRAE standaard 160P [2] stelt dat de 30-dagen-gemiddelde relatieve vochtigheid aan het metaaloppervlak lager moet zijn dan 80% indien er geen gegevens zijn over het gedrag van het gebruikte metaal in de constructie. Indien dit wel het geval is, kunnen specifieke maatregelen getroffen worden voor de beschouwde bouwconstructie.

2.5 Biologische aantasting

Onder biologische aantasting valt zowel de schade veroorzaakt door bacteriën, insecten en schimmels. Aantasting door bacteriën komt enkel voor bij zeer hoge vochtigheden, vooral bij net geveld hout dat in contact staat met water of natte grond. Bacteriën kunnen ervoor zorgen dat de permeabiliteit van het hout sterk toeneemt. De invloed op de sterke is kleiner [5].

Het risico op biologische aantasting door insecten wordt geëvalueerd in de Belgische norm NBN-EN 350-2. Ofwel is het hout gevoelig voor aantasting door insecten, ofwel is het niet gevoelig, en dus duurzaam. Indien een bepaalde houtsoort gevoelig is, kan men nog een onderverdeling maken tussen houtsoorten waarvan enkel het spinthout gevoelig is (S), en houtsoorten waarvan zowel het kern- als spinthout gevoelig is (SH). Het risico op biologische aantasting door termieten is in onze contreien zo goed als onbestaande. De resistentie tegen aantasting door mariene boorders (NBN-EN 275) wordt hier niet verder besproken, omdat ze in houtskeletbouw zonder grondcontact niet voorkomen [83].

De voorlopige Duitse normenreeks over bescherming van hout DIN 68800:2009 stelt dat er geen gevaar bestaat voor insectenaantasting indien het hout bij meer dan 55°C gedroogd wordt of indien het constructief wordt afgeschermd voor insecten. Ook houtderivaten die bij een temperatuur van meer dan 55°C worden geproduceerd zijn ongevoelig voor insecten [20].

Bij schimmels wordt een onderscheid gemaakt tussen houtaantastende schimmels of zwammen (Eng: Decay Fungi), blauwschimmels (Eng: Stains) en oppervlakteschimmels (Eng: Moulds). De laatste twee behoren tot de lagere schimmels.

2.5.1 Houtaantastende schimmels

Deze schimmels en zwammen halen voedingsstoffen uit het verteren van de celwanden van het hout, wat dus een aantasting van het hout als gevolg heeft en een verminderde sterkte. Zij scheiden verschillende enzymen af die de celwand depolymerizeren. Lagere schimmels halen hun voedingsstoffen uit materiaal dat opgeslagen wordt in de celholtes, of uit materiaal aan het houtoppervlak. Deze zijn van kleinere invloed op de sterkte [5]. Houtaantastende schimmels hebben vrij water nodig om de sporen te doen ontkiemen en vereisen een hoog houtvochtgehalte (M% > 25).

Op basis van fysische en chemische veranderingen in het hout, en de resulterende kleuren en verschijningsvormen worden houtaantastende schimmels onderverdeeld in bruinrot, witrot en zachtrot. Bruinrot en witrot kunnen onder gunstige omstandigheden zeer snel het hout aantasten. Witrot kan ervoor zorgen dat het hout bleek uitslaat, en uiteindelijk enkel uit een witte, vezelachtige materie bestaat. Bruinrot laat het hout donkerder worden, krimpen en uiteenbrokkelen. Zij vallen meestal naaldhout aan. Deze houtsoorten worden ook het meest gebruikt in de bouwsector, waardoor bruinrot een veelvoorkomend probleem is. Een specialere vorm van bruinrot is droogrot: De droogrotschimmel kan vocht transporteren over de zwamdraden en zo zelfs droog hout aantasten. Droogrot kan zich ontwikkelen bij erg lage

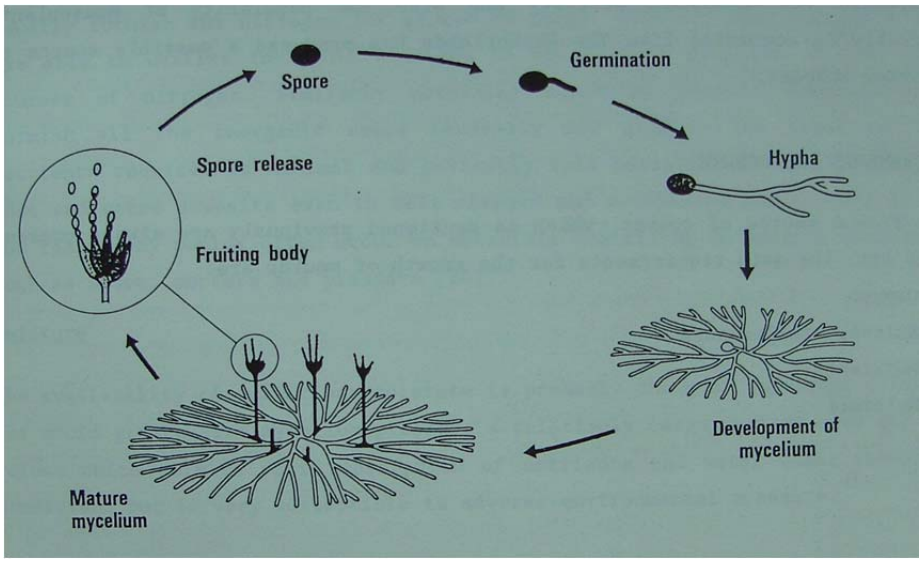
houtvochtgehaltes, tot 16 M%. Bij de afbraak van de cellulosevezels, kan eveneens vocht geproduceerd worden door de schimmel zelf [26]. Zachtrot leunt dichter aan bij de lagere schimmels dan bruin- of witrot. Zachtrot wordt veeleer geassociëerd met zeer natte omstandigheden, zoals in constructies onder de grond.

Door de ontbinding van het hout ontstaat er massaverlies. Dit is het eigenlijke houtrot. Er is een afname van volumemassa, waardoor de porositeit stijgt en de mechanische sterkte afneemt. Het houtbederf vindt plaats in enkele weken. Hoe snel het houtbederf plaatsvindt bij fluctuerende omstandigheden, is niet altijd eenvoudig te definiëren [83].

2.5.2 LAGERE SCHIMMELS

Daarnaast zijn er ook lagere schimmels, die de houtstructuur niet aantasten. Op zich zijn deze schimmels niet gevaarlijk voor de sterkte van de constructie, maar wel voor de menselijke gezondheid. Deze schimmels kunnen een allergische reactie uitlokken of ademhalingsproblemen veroorzaken. Andere ongemakken zijn vooral van esthetische aard, daar deze schimmels gekleurde vlekken vormen op of net onder het oppervlak. Deze schimmels komen voor onder minder specifieke omstandigheden dan de houtaantastende schimmels en vormen een eerste waarschuwing. Verder wordt hier een groeimodel besproken om de ontkieming van deze schimmels te kunnen inschatten.

De levenscyclus van een schimmelkolonie kan opgedeeld worden in 3 fases: De eerste 2 (ontkieming van de sporen en mycelium groei) behoren tot de vegatieve groei, terwijl de sporenformatie behoort tot de reproductiefase.



FIGUUR 11 - LEVENSCYCLUS VAN EEN SCHIMMEL [32].

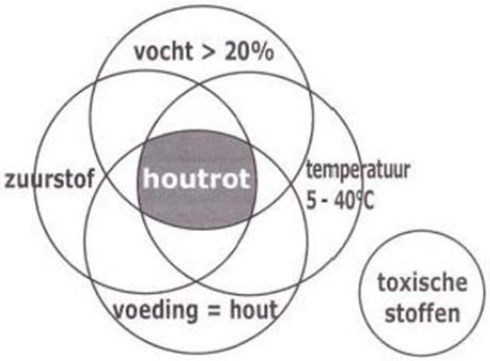
Sporen komen overal voor en worden zowel getransporteerd door de wind, als door mensen en dieren. Deze sporen drogen eerst uit, vooraleer ze terug vocht opnemen om over te gaan tot ontkieming. Onder gunstige omstandigheden ontkiemt de spore van de schimmel. Als de omstandigheden gunstig blijven, begint de schimmel te groeien. Er worden zeer fijne, meestal kleurloze draden gevormd, dit zijn hyfen of schimmeldraden. Het totale, zichtbare netwerk van de zwamdraden wordt het mycelium (of zwamvlokken) genoemd. Eens de schimmel in de vegetatieve fase zit, groeit het mycelium in alle richtingen op en in het houtoppervlak, en neemt hieruit voedingsstoffen op. Na een bepaalde periode van groei, gaat de schimmel over tot reproductie, met het vormen van sporen, één- of meercellige lichaampjes, die loskomen van de schimmel en meengenomen worden door bv de wind om een nieuwe schimmel ergens te vormen. Het mycelium zal hierna niet afsterven, maar blijven groeien en opnieuw sporen vormen. Indien de leefomstandigheden verminderen, zal de schimmel zelfs meer sporen aanmaken [73].

Schimmels kunnen ook terechtkomen in een 'slapende', vegatieve toestand, doordat er te weinig vocht aanwezig is in de omgeving om de groei verder te zetten. Dit kan even uitgesteld worden door de aanmaak van water door de metabolische activiteit. De overleving van schimmels in droog hout wordt ook anabiosis [81] genoemd. Dit impliceert ook dat er een risico is dat geïnfecteerd hout gebruikt wordt voor een constructie, zonder dat dit op die moment zichtbaar is[3].

2.5.3 Voorwaarden voor ontkieming en schimmelgroei

Er moet aan een aantal voorwaarden voldaan worden voor een schimmel kan ontkiemen en verder groeien:

- Er moeten sporen aanwezig zijn.
- Een hoog genoeg vochtgehalte gedurende een bepaalde periode.
- De schimmel moet zich op een geschikte voedingsbodem kunnen vestigen.
- Het substraat mag geen toxische stoffen bevatten.
- De luchttemperatuur moet binnen bepaalde grenzen blijven.
- Er moet voldoende zuurstof aanwezig zijn, dit ook voor een voldoende lange periode.



FIGUUR 12 - VOORWAARDEN VOOR HOUTROT [23].

Sporen

Sporen zijn altijd aanwezig in lucht. Ze komen overal voor, vooral in de nabijheid van bossen. Ze kunnen op verschillende manieren getransporteerd worden en het is bijna onmogelijk deze uit gebouwen en bouwmaterialen te houden.

Luchttemperatuur

De ideale temperatuur voor de ontkieming en groei van schimmels is niet eenduidig bepaald en afhankelijk van verschillende soorten. Een bereik van 0°C tot 50°C wordt meestal aangenomen. Er wordt ook aangenomen dat ze meer tolerant zijn tegenover koudere temperaturen dan warme. De voedingsindustrie maakt hier dankbaar gebruik van door producten kortstondig op te warmen tot 80°C. Temperaturen buiten dit bereik zijn meestal niet dodelijk, maar stoppen wel de groei van de schimmel (zie eerder).

Zuurstof

Schimmels hebben zuurstof nodig om te overleven. Waar sporen in de lucht voorkomen, zal hoogstwaarschijnlijk ook genoeg zuurstof aanwezig zijn voor ontkieming. Enkel onder water wordt aan deze voorwaarde niet voldaan.

[3] Dit geldt enkel voor droging met buitenlucht. Droging onder hogere temperaturen is dodelijk voor de achtergebleven schimmels in het hout [5].

Substraat
De schimmel moet zich kunnen vestigen op een voldoende voedingsbodem. Onbehandeld hout is een ideale voedingsbodem voor schimmels. Niet-poreuze materialen zoals glas of kunststof, slaan geen vocht op in hun poriën, terwijl poreuze materialen wel voldoende hygroscopisch vocht kunnen bevatten voor schimmelontwikkeling. Onder de poreuze materialen zijn organische materialen, zoals behangpapier en hout gevoeliger dan minerale materialen zoals baksteen en pleisterwerk [83].

Vochtgehalte
Het beslissende criterium voor schimmelgroei is het aanwezige vochtgehalte, wat niet alleen uit het substraat kan opgenomen worden, maar ook door de omgevende lucht, zowel in de vorm van water, als in de vorm van waterdamp. Dit vochtgehalte wordt in de biologie veelal beschreven als de wateractiviteit a_w, die direct verbonden is met de relatieve vochtigheid in het materiaal of op het oppervlak:

$$\varphi = a_w \,.\, 100$$

a_w	[-]	Wateractiviteit

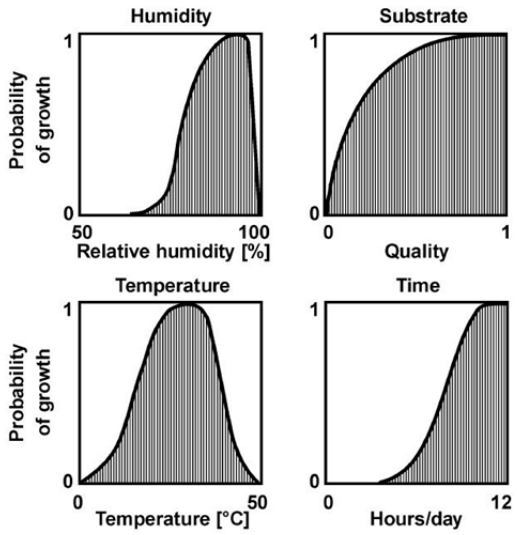
De ideale relatieve vochtigheid voor groei is afhankelijk van de verschillende soorten schimmel. Volgens enkele proeven kan de limiet voor schimmelgroei in gebouwen genomen worden op ongeveer 70% [73]. Wanneer de vochtigheid stijgt, zal ook de waarschijnlijkheid van ontkieming verder stijgen, tot 80% RV, waarbij de meeste schimmels de nodige groeicondities bereikt hebben.

De factoren temperatuur en vocht werden hier onafhankelijk van elkaar bekeken, maar zijn onderling verbonden. De optimale relatieve vochtigheid en het bereik waarbinnen schimmelgroei voorkomt, zijn afhankelijk van de heersende temperatuur. Deze twee invloeden komen samen in lijnen van gelijke groei (isopleten) en zullen de basis vormen voor de uitwerking van een model.

pH-waarde
De zuurtegraad van het substraat kan ook van invloed zijn. Zo bevindt de ideale groei zich tussen de pH-waarden 5 en 7. In een bereik tussen 2 en 11 kunnen verschillende schimmels groeien. Oppervlakteschimmels kunnen ook lokaal de zuurtegraad van hun directe omgeving aanpassen in hun voordeel.

Licht
Oppervlakteschimmels hebben geen licht nodig om te groeien. Het is niet nodig deze factor als mogelijke invloed te beschouwen [73].

Tijd
Tijd is een doorslagevende factor binnen het ontkiemen en de verdere groei van schimmels. Onder werkelijke omstandigheden zullen zich zelden stationaire condities voordoen, terwijl dit bij proeven meestal wel het geval is.



FIGUUR 13 - KWALITATIEVE BESCHOUWING VAN ENKELE INVLOEDEN OP DE GROEI VAN SCHIMMELS [73].

2.5.4 SCHIMMELONTWIKKELING VOORSPELLEN

Er bestaan verschillende modellen om schimmelontwikkeling te voorspellen en de snelheid van groei in te schatten. Door de jaren heen werden deze verfijnd en omgezet naar computermodellen. We bespreken enkele van de belangrijkste.

TIME OF WETNESS (TOW)

Adan [1] beschrijft als een van de eersten het ontkiemen en de groei van schimmels. Om de bevindingen uit stationaire proeven en de werkelijkheid te vergelijken, definiëert hij de 'Time of wetness', dit is het aantal uren dat de relatieve vochtigheid boven een kritische waarde uitstijgt, en dit per dag.

TEMPERATUURFACTOR F

In EN ISO 13788 [6] definiërt men een dimensieloze temperatuursfactor, langs de binnenzijde van de constructie:

$$f = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

θ_{si}	[°C]	Binnenoppervlaktetemperatuur
θ_i	[°C]	Binnentemperatuur
θ_e	[°C]	Buitentemperatuur

De temperatuursfactor *f* moet op elk punt van het binnenoppervlak van de constructie groter zijn dan 0,7. Bij de bepaling van f moet men bovendien gebruik maken van een warmteovergangscoëfficiënt 5W/(m²K). De norm stelt dat om schimmelgroei te vermijden de maandelijkse, gemiddelde relatieve vochtigheid aan het oppervlak nooit 0,8 mag overschrijden. De methode bestaat erin om voor elke maand de interne dampdruk te bepalen en dan, gebaseerd op de geëiste relatieve vochtigheid op het oppervlak, de minimum aanvaardbare verzadigingsdampdruk op het oppervlak te bepalen. Hieruit kan dan een minimale oppervlaktetemperatuur bepaald worden en hieruit een thermische kwaliteit van de constructieopbouw, uitgedrukt in de temperatuurfactor *f*. De maand met de hoogste eis voor *f* is de kritische maand [6].

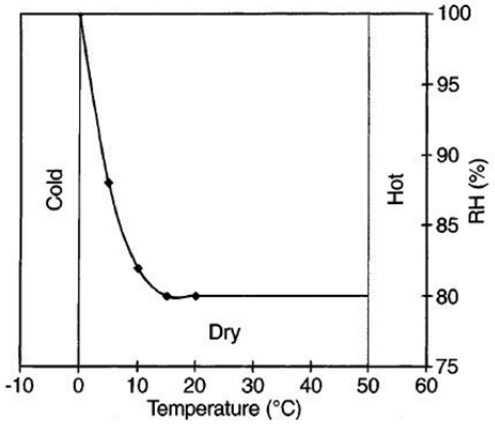
De Amerikaanse norm ASHRAE 160-P [2] legt minimale tijdseisen op om de ontwikkeling van schimmels te voorkomen:

- Dertig daagse gemiddelde relatieve vochtigheid aan de oppervlakte < 80% bij een temperatuurbereik van 5°C-40°C.
- 7 daagse gemiddelde relatieve vochtigheid aan de oppervlakte < 98% bij een temperatuurbereik van 5°C-40°C.
- 24 uurs gemiddelde relatieve vochtigheid aan de oppervlakte < 100% bij een temperatuurbereik van 5°C-40°C.

De schimmelindex

Dit model werd ontwikkeld door Viitanen, Ritschkoff en Hukka [85],[31]. Zij introduceren een nieuwe term: de Mould Index (MI), waarbij de schimmelgroei ingedeeld wordt in 7 klassen.

Mould Index (MI)	Bedekte oppervlakte [%]	Beschrijving
0	0	Geen groei
1	≤ 1	Weinig groei, enkel zichtbaar onder een microscoop
2	≤ 10	Matige groei, enkel zichtbaar onder een microscoop
3	≤ 30	Zichtbare groei
4	≤ 70	
5	> 70	
6	100	



FIGUUR 14 - CONDITIES VOOR DE ONTWIKKELING VAN SCHIMMEL ALS EEN MATHEMATISCH MODEL [31].

De schimmelindex wordt beschreven aan de hand van verschillende wiskundige formules en kan gebruikt worden bij de evaluatie van simulaties en proefopstellingen. Een nadeel is dat het model gebasseerd werd op proefonderzoek op dennen- en sparrenhout, en dus niet toepasbaar is op andere bouwmaterialen.

Isopleten-model

Sedlbauer [73] beschrijft zijn bevindingen in 2 modellen: Het isopleten-model en het biohygrothermisch model. In beide modellen gaat hij ervan uit dat aan 3 factoren, relatieve vochtigheid, temperatuur en voedingsbodem, gedurende een voldoende tijd moet voldaan zijn.

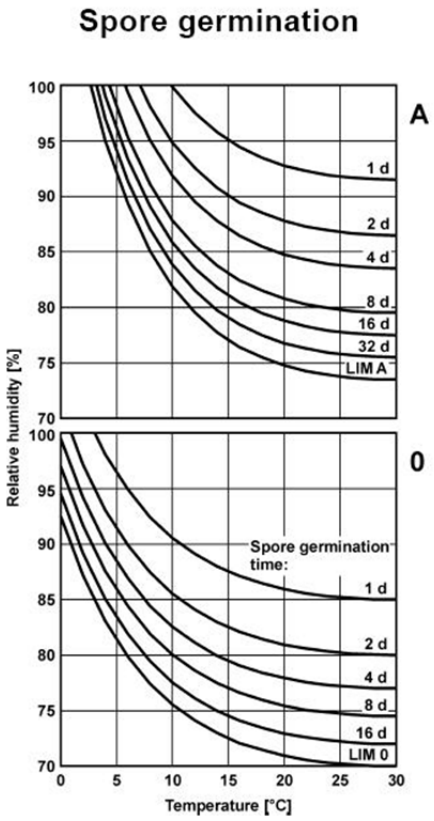
Het isopleten-model vergelijkt de hygrothermische omstandigheden voor de groeicondities van ontkieming en mycelium-groei. Deze beschrijven de ontkiemingstijd en groeisnelheid afhankelijk van de relatieve vochtigheid en de temperatuur.

Om dit model verder te ontwikkelen, worden verschillende substraten gedefiniëerd, naar gelang de geschiktheid voor schimmelgroei:

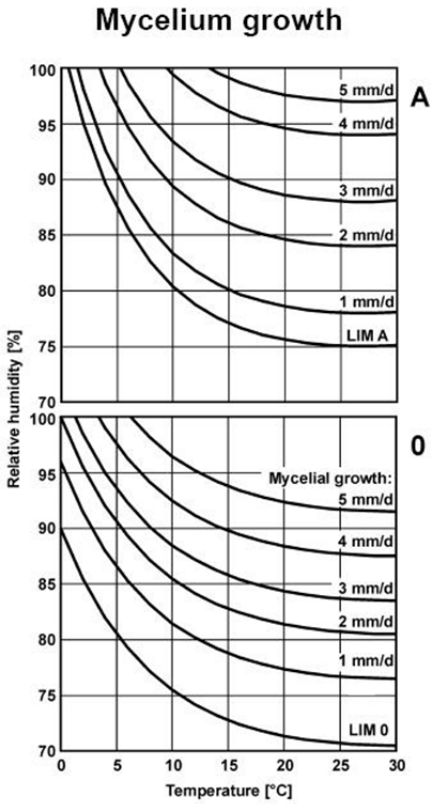
- Categorie 0: optimaal medium.
- Categorie I: biologisch recycleerbare bouwmaterialen, vb. papier, materialen gemaakt uit biologisch afbreekbare grondstoffen en materiaal voor permanente elastische verbindingen.
- Categorie II: materialen met een poreuze structuur, zoals minerale bouwmaterialen, bepaalde houtsoorten en isolatiematerialen.
- Categorie III: materialen die noch degradeerbaar zijn noch voedingsstoffen bevatten, deze categorie materialen wordt dus niet verder beschouwd.

Een verdere opdeling wordt gemaakt aan de hand van het gezondheidsrisico voor de gebruikers van de gebouwen. Er worden 3 gevaarklassen onderscheiden:

- Klasse A: De schimmel of zijn metabolische producten zijn hoogst pathogeen: Zij mogen niet voorkomen in gebruikte woningen.
- Klasse B: De schimmel is pathogeen wanneer deze over een langere periode wordt blootgesteld en kan allergische reacties uitlokken.
- Klasse C: De schimmel is niet gevaarlijk voor de gezondheid, maar kan wel economische schade aan de constructie aanrichten.



FIGUUR 15 - ISOPLEET VOOR ONTKIEMING, VOOR ALLE SCHIMMELS VAN KLASSE A (BOVEN) EN B/C (ONDER) [73].



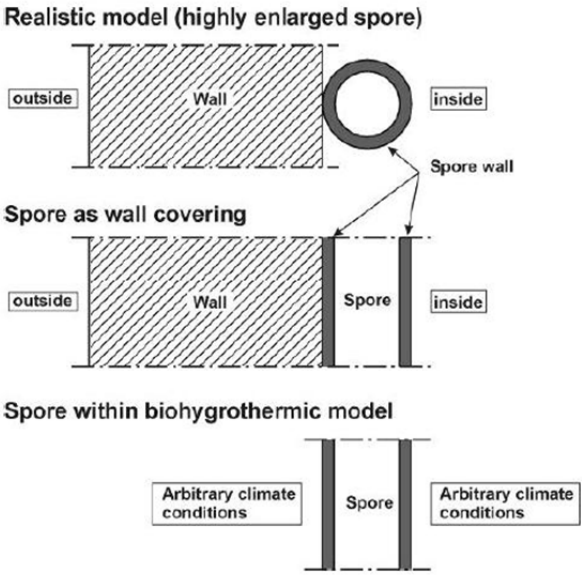
FIGUUR 16 - ISOPLEET VOOR DE MYCELIUM-GROEI, VOOR ALLE SCHIMMELS VAN KLASSE A(BOVEN) EN B/C(ONDER) [73].

Bij het verder onderverdelen van de schimmels die voorkomen in gebouwen blijkt dat de waarden voor klasse B en C niet erg verschillen en dus samen bekeken kunnen worden. Dit levert een bepaald aantal isopleet-modellen op, afhankelijk van de gevaarklasse en substraatgroep. Per model kan een laagste isopleet beschouwd worden, hieronder is er geen schimmelactiviteit meer. Deze lijn wordt de 'Lowest Isopleth for Mould' (LIM) genoemd. De temperaturen die bekeken worden liggen in een bereik van 0 tot 30°C, deze zijn het interessantst vanuit bouwfysisch oogpunt. De LIM beschrijft de toestand waarbij oneindig veel tijd nodig is voor ontkieming of waarbij de schimmel groeit aan een snelheid van 0mm/dag.

Een nadeel van het isopleet-systeem is dat uitdroging van de schimmelsporen niet mee in rekening gebracht kan worden, in samenwerking met de heersende, ogenblikkelijke omgevingscondities. Het model zal dus meer ontkieming voorspellen dan er zich in werkelijkheid voordoet. In navolging hiervan werd het bio-hygrothermisch model opgesteld.

BIO-HYGROTHERMISCH MODEL

Dit model maakt het mogelijk de vochtbalans van een enkele spoor te beschrijven, afhankelijk van de huidige omgevingsrandvoorwaarden. Het model is er op gebaseerd dat een spoor een zekere osmotische werking[4] bezit en dus waterdamp uit de onmiddelijke omgeving, zowel uit de lucht als een aangrenzend materiaal, kan opnemen en verder opslaan. De opname van vocht door het spoor wordt door diffusie en osmose beschreven in een wiskundig model en vochtretentiecurve. De vochtafhankelijke weerstand tegen diffusie s_d van de sporenwand vertraagt deze opname. De opname van vocht via diffusie/osmose gaat verder tot een zeker vochtgehalte in het spoor bereikt wordt en het metabolisme kan opgestart worden.



FIGUUR 17 - SCHEMA VAN EEN SPOOR OP EEN MUUR, EEN SPOOR ALS MUURBEDEKKING, EN EEN MODELSPOOR [73].

Aan de hand van de LIM-curve wordt bepaald of er al dan niet schimmelvorming optreedt. Voor de spoor wordt verder ook een vochtopslagcurve opgesteld en zo de kritische vochthoeveelheid voor ontkieming. De verdere modellering van de schimmelgroei staat nog niet nog op punt, maar is voorlopig ook niet nodig, daar de start van schimmelgroei de grenstoestand is die niet overschreden mag worden. Om de invloeden van het substraat mee in beschouwing te nemen, kunnen de s_d-waarden van de spoorwand aangepast en de vochtretentiecurve verhoogd worden[73].

[4] Omwille van de aanwezigheid van zouten, suikers en andere substanties aanwezig in de cellenstructuur.

2.5.5 WUFI-BIO

Om nu de dynamische randvoorwaarden, temperatuur en relatieve vochtigheid op verschillende plaatsen in de constructie, in rekening te brengen zijn er verschillende mogelijkheden. Wanneer er geen lokaal gemeten waarden voorhande zijn, is het mogelijk gebruik te maken van een hygrothermisch simulatieprogramma, zoals WUFI. Hierbij worden alle fysische effecten in rekening gebracht om de temperatuur en vochtcondities in de constructie te bepalen.

Deze toepassing op het WUFI-simulatiepakket werd aan het IBP verder uitgewerkt door Sedlbauer, Krus ea. [49]. Het bio-hygrothermisch model zal de resultaten uit de berekingen als input gebruiken. In het model werd de spoor eerst als een 'biologische' muur bekeken, om zo in het WUFI-simulatieprogramma op te nemen. Echter, in deze ééndimensionale berekeningen kan het spoor niet als een aparte materiaallaag beschouwd worden, aangezien dit een onrealistisch hoge diffusieweerstand tussen het muuroppervlak en de binnenlucht zou introduceren. Hierdoor kan de muur en het spoor niet tegelijkertijd gemodelleerd worden. In een eerste stap wordt de vochtbalans van de muur en zijn omgeving berekend. In de tweede stap worden deze data gebruikt als randvoorwaarden voor het bio-hygrothermisch computermodel. Wanneer het vochtgehalte een zeker limiet overstijgt, zal het model schimmelgroei voorspellen [49].

BEPERKINGEN

De diameter van een spoor is in de grootte-orde van ongeveer 3 µm. Aangezien het WUFI-programma ontwikkeld werd voor bouwconstructies, kunnen zulke kleine afmetingen niet ingevoerd worden. In het model is daarom uitgegaan van een grotere spoor (1 cm). Alle hygrothermische parameters werden hieraan aangepast. De gebruikte vochtopslagcurve voor schimmels is oorspronkelijk van bacteriën en werd licht aangepast. Ook de permeabiliteit en dampdiffusieweerstand van een spoor kunnen niet direct gemeten worden, door zijn kleine dimensies. Deze werden iteratief bepaald, gebruikmakend van de resultaten uit laboratoriumproeven. Verdere bepaling van de vochtopslagfunctie van verschillende sporen is nodig, alsook de vocht- en temperatuursafhankelijke diffusieweerstand en permeabiliteit. Sedlbauer [73] haalt zelf nog enkele andere beperkingen aan:

- Verschillende invloedsfactoren, zoals de pH-waarde, het zoutgehalte, licht, zuurstofgraad, oppervlaktekwaliteit en biogene factoren, worden niet beschouwd in het model, maar er wordt aangenomen dat deze de ontkieming en groei niet belemmeren.
- Verschillen in het osmotisch potentiaal van diverse substraten worden deels verwaarloosd in het isopleten-model door ze vereenvoudigd onder te verdelen in substraatklassen. Hetzelfde geldt voor mogelijke besmettingen van het constructie-onderdeel. Bij onzekerheid wordt hierdoor altijd een meer kritische groep gekozen.
- De substraten/voedingsbodems worden ook niet direct opgenomen in het bio-hygrothermisch rekenmodel, door de onmogelijkheid dit in het model tegelijkertijd te berekenen. Hiervoor geldt dezelfde vereenvoudiging.
- De vochtopslagfunctie voor schimmels is een aanname, aan de hand van het model voor bacteriën en enkele experimenten. Verder onderscheid tussen verschillende schimmels is ook niet mogelijk.

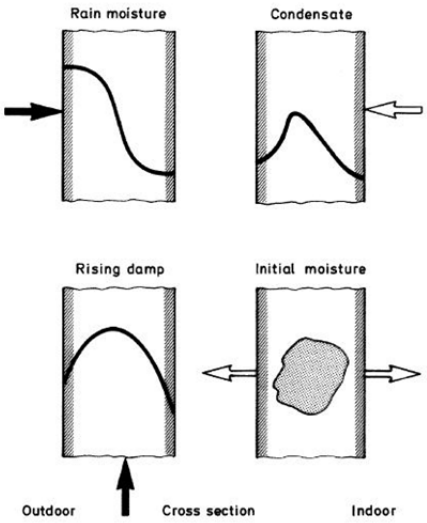
3. VOCHT EN DAKEN

3.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op de mogelijke vochtbronnen in (platte) daken en mogelijke strategiën om dit te verhinderen. Ook bekijken we verschillende mogelijke opbouwen van platte daken, waaruit het compacte dak verder wordt toegelicht, alsook de vochtgestuurde damprem.

3.2 VOCHTBRONNEN

De aanwezigheid van vocht in daken is nooit volledig uit te sluiten en kan op verschillende manieren een weg naar binnen vinden. Künzel [56] beschrijft 4 primaire vochtbronnen: 1. Vloeibaar water door regen, sneeuw of interne lekken; 2. Waterdamp die zich zowel langs buiten als langs binnen een weg in de constructie kan zoeken; 3. Stijgend vocht vanuit de grond; en 4. Vocht dat zich initieel in het bouwmateriaal bevindt.



FIGUUR 18 - SCHEMA VAN DE MOGELIJKE VOCHTBRONNEN IN EEN CONSTRUCTIE [56].

3.2.1 BOUWVOCHT

Vocht kan reeds vanaf het begin van de constructie binnengebracht worden door het gebruik van vochtige materialen, of materialen die vocht nodig hebben in de opbouw, zoals beton en metselwerk. Deze hoeveelheid vocht kan bepalend zijn voor het verdere verloop, en het is dan ook belangrijk droge materialen te gebruiken, zeker wanneer deze materialen verder ingesloten worden en moeilijk kunnen uitdrogen. In daken is het vooral belangrijk het constructiehout en de houten beboarding droog te houden. In slechte omstandigheden kunnen deze al een vochtgehalte tot 22 M% bevatten.

3.2.2 DAMPDIFFUSIE DOORHEEN DE DAMPREMMENDE LAAG

In België (een gematigd klimaat) loopt de dampstroom doorheen een dak veelal van binnen naar buiten. De grootte van deze dampstroom kan beperkt worden door het plaatsen van een dampremmende laag langs de binnenzijde van de constructie. Toch zal er vocht opgeslagen worden in de constructie en is het van belang dat dit de constructie ook terug kan verlaten. Daarvoor zijn meer dampopen materialen nodig (zie verder: vochtgestuurde damprem).

3.2.3 Convectie

Het is moeilijk deze factor juist in te schatten en mee te nemen in de berekeningen, maar de vochtoename door convectie binnen het dak mag zeker niet verwaarloosd worden en kan zelfs deze door dampdiffusie overstijgen. Juiste uitvoering en detaillering is hiervoor wel nodig, zodat geen luchtlekken onstaan. Kleine openingen in de dampremmende laag kunnen de vochtbalans van het dak volledig doen overhellen. Bij luchtlekken wordt dikwijls onderscheid gemaakt tussen warmte- en vochtlekken. Warmtelekken zijn die lekken waarbij de exfiltrerende lucht weinig afkoelt en weinig vocht in de constructie achterlaat. Bij vochtlekken koelt de lucht wel sterk af door de geometrie en snelheid waarmee de lucht exfiltreert zodat er mogelijk veel vocht in de constructie achterblijft per hoeveelheid exfiltrerende lucht [37].

3.2.4 Laterale diffusie

Bij laterale- of flankdiffusie migreert vocht doorheen een bouwdeel dat de dampremmende laag penetreert zonder dat dit gepaard gaat met de aanwezigheid van een luchtlek. Bij de vochtindringing kunnen verschillende transportvormen betrokken zijn. Flankdiffusie kan er toe leiden dat per lopende meter doorboring elke dag enkele tientallen gram vocht extra in de dakconstructie terecht komt [56],[20].

3.2.5 Regendoorslag

Water kan door de capillaire werking van bouwmaterialen, die in contact staan met water, opgezogen worden in de dakconstructie. Dit kan vermeden worden door een niet-capillaire laag toe te voegen en de constructie te beschermen tegen stilstaand water.

3.2.6 Capillaire opzuiging van condensatie (koudebruggen)

Bij het wassen, douchen, baden, kuisen, koken, ademen,... produceert de mens vocht. Indien deze vochtproductie niet tijdig wordt afgevoerd door ventilatie kan er oppervlaktecondensatie onstaan, en zo verder het materiaal binnendringen. Deze oppervlaktecondensatie kan ook aanleiding geven tot schimmelvorming, meestal ter plaatse van plekken die niet goed kunnen uitdrogen, zoals in hoeken, achter kasten en radiatoren, of door slecht ontworpen bouwknopen waar de oppervlaktetemperatuur lager ligt dan op de rest van het oppervlak.

3.2.7 Uitzonderlijke situaties

Lekken in leidingen, overstromingen,... worden beschouwd als toevalligheden. Deze worden niet meegenomen in de berekeningen.

3.3 Vochtstrategiën

Om de impact van vocht in een constructie te vermijden zijn er 3 mogelijke strategiën, waaraan best voldaan kan worden:

1. Indringen van vocht vermijden.
2. De mogelijkheid voorzien om een kleine hoeveelheid vocht te kunnen opnemen, zonder deze schade aan de constructie toebrengt.
3. Het vocht moet de constructie terug kunnen verlaten.

Het indringen van vocht vermijden, gebeurt meestal door het plaatsen van een dampremmende laag of luchtdichtingslaag. In de praktijk wordt dit vaak gecombineerd. Om terug de constructie te verlaten dient men met dampopen materialen te werken. Omdat de dampstroom in België vooral van binnen naar buiten loopt, is de meest logische oplossing de buitenzijde dampopen te houden. Dit is voor meeste constructies eenvoudig te bewerkstelligen, zoals muren en hellende daken. Bij platte daken is dit niet te realiseren, en moet men op zoek naar andere strategiën.

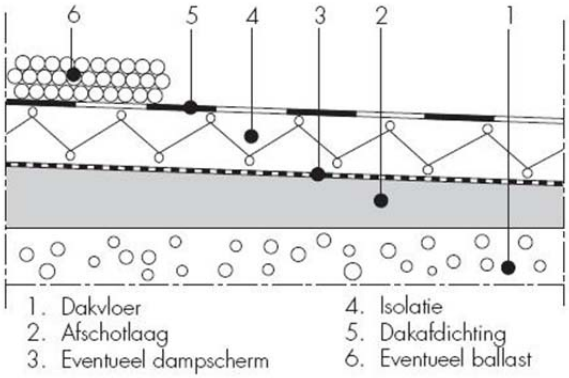
Een ander actiedomein is het tijdelijk opslaan van vocht in de constructie, zodat deze andere delen niet kan aantasten. Hiervoor kunnen hygroscopische materialen gebruikt worden, die het vocht bufferen zonder zijn thermische en/of andere eigenschappen te verliezen. Hout kan ook een bepaalde hoeveelheid vocht opnemen, vooraleer er een gevaar op schimmelontwikkeling ontstaat.

3.4 Verschillende houten plattedakopbouwen

In 'TVN 215: Het platte dak: Opbouw, materialen, uitvoering en onderhoud' [88] worden slechts 2 soorten dakopbouw aangeraden: het 'warme dak' en 'omkeerdak'. Bij deze dakopbouwen bevinden de thermische isolatie en de dampdichting zich bovenop de dakvloer zodat het dampscherm op een continue drager geplaatst kan worden, maar ook het 'compacte dak' blijkt een waardig alternatief [63].

3.4.1 Warm dak

Dit is de meest voorkomende oplossing, waarbij de isolatie op de dakvloer wordt aangebracht en waarbij er geen met buitenlucht geventileerde spouw aanwezig is tussen de verschillende lagen. De afdichting wordt, naar gelang van het geval, met of zonder scheidingslaag, op de isolatie geplaatst en gebeurlijk geballast. Vooraf moet er op de dakvloer een dampscherm worden aangebracht [88].



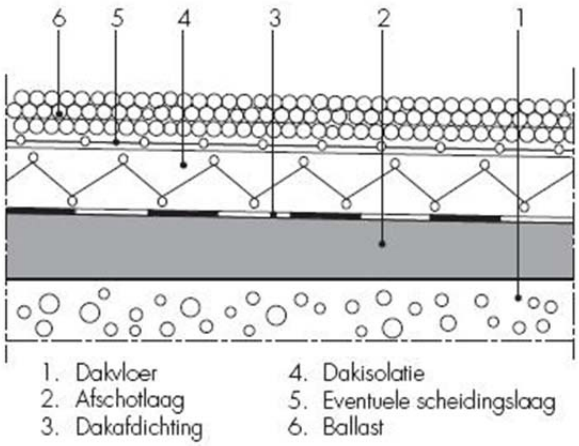
FIGUUR 19 - OPBOUW WARM DAK [88].

Bij een warm dak wordt de dakvloer door de isolatie beschermd tegen sterke temperatuurschommelingen, waardoor het gevaar op bewegingen en scheuren in de dakvloer en de muren beperkt wordt. In het algemeen wordt het warm dak als zeer veilige opbouw gezien waarbij de kans op bouwschade klein is omdat de draagstructuur zich volledig aan de warme zijde van de dakconstructie bevindt.

Een voordeel van het warme dak is het feit dat de damprem continu op de dakvloer kan liggen, zelfs tijdelijk dienst kan doen als dakafdichting, en er zo een kleinere kans op perforaties bestaat. Ook de thermische isolatie loopt door en wordt niet onderbroken door constructie-elementen. Een nadeel is de grote opbouwhoogte.

3.4.2 Omkeerdak

Bij een omkeerdak wordt de afdichting meestal op de dakvloer gekleefd/gehecht en ligt de isolatie los op de afdichting. De isolatie bestaat uit geëxtrudeerde polystyreenplaten (XPS) die met grind of tegels op tegeldragers worden geballast. XPS is hiervoor geschikt gezien de beperkte vochtopname bij rechtstreekse blootstelling aan regenwater op, onder en tussen de platen. Het gewicht van de ballast moet voldoende zijn om het afwaaien of opdrijven van de isolatieplaten te voorkomen. De ballast beschermt de isolatieplaten bovendien tegen UV-straling [88].

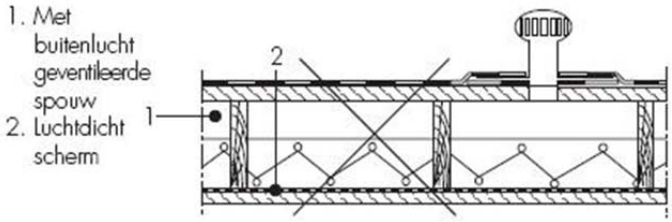


FIGUUR 20 - OPBOUW OMKEERDAK [88].

Meer nog dan op een warm dak moet de helling van het dak en van de gootzone voldoende zijn (2 % minimaal) voor een snelle waterafvoer en om het warmteverlies door het aflopende water te verminderen en interne condensatie te vermijden. Bij een omkeerdak is geen extra dampscherm nodig aangezien de onderliggende afdichting als dampscherm fungeert. Het belangrijkste nadeel van dit type dak is de thermische verliezen door het vocht dat tussen en onder de isolatie loopt.

3.4.3 Koud dak

Dit type dak wordt afgeraden in de technische voorlichting. Het is een verouderde opbouw die aanleiding kan geven tot aanzienlijke schade vooral door inwendige condensatie ingevolge luchtlekken en onderkoelingscondensatie, die het rotten van vochtgevoelige dakvloeren veroorzaakt. Dit probleem is zeer moeilijk te vermijden en stelt zich nog scherper indien er ventilatiepijpjes zijn op het dak [88].



FIGUUR 21 - OPBOUW KOUD DAK [88].

3.4.4 Compact dak

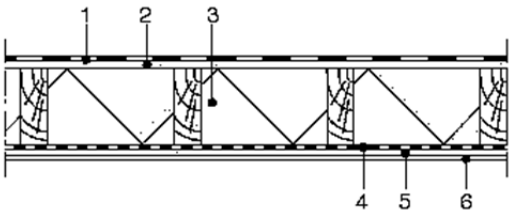
Momenteel wordt er bij platte daken met houten dakvloeren meer en meer gekozen voor een nieuwe dakopbouw: het zogenaamde ‘compactdak’. Het compacte platte dak bestaat uit een balkenlaag van horizontale vloerbalken, massieve balken of I-liggers. De liggers worden aan de uiteinden ondersteund door de koppelregel of opgehangen in de daarvoor bestemde balkschoenen. De aansluiting van het compacte platte dak met de buitenwand wordt luchtdicht afgewerkt. Tussen de houten structuur wordt isolatie aangebracht. De isolatie vult de volledige ruimte tot tegen de dakvloer. Na het plaatsen van hellingsspiën wordt het dak aan de buitenzijde afgewerkt met massieve planken of platen waarop de dakdichting wordt aangebracht. Aan de binnenzijde wordt het dak luchtdicht afgewerkt [77].

De redenen waarom deze dakopbouw momenteel gepromoot wordt, zijn de volgende:

- De plaats die men wint doordat de thermische isolatie in de beschikbare ruimte tussen de liggers geplaatst kan worden en er aldus geen thermische isolatie op de dakvloer aangebracht dient te worden. Men dient er echter wel rekening mee te houden dat men eventueel langs de binnenzijde

plaats kan verliezen (bv. door een grotere isolatiedikte dan de hoogte van de balken, door het voorzien van een leidingspouw, …)

- De goede beloopbaarheid ervan. Er is evenmin drukvaste isolatie nodig omdat ze niet rechtstreeks belopen wordt.
- De continuïteit van de luchtdichtheid tussen het dak en de verticale wanden is eenvoudiger te realiseren (het gebruik van wachtfolies kan immers vermeden worden) en indien nodig te remediëren/ herstellen [63].



1 Afdichting
2 Dakbeplating
3 Isolatie
4 Lucht- en damp-scherm
5 Latwerk
6 Binnenafwerking

FIGUUR 22 - OPBOUW COMPACTDAK [63].

VOORWAARDEN EN AANBEVELINGEN

De technische documenten voor deze daksystemen sommen een aantal randvoorwaarden op die de goede werking van de dakopbouw moeten garanderen. Dit systeem is enkel toepasbaar voor gebouwen met een binnenklimaatklasse lager dan of gelijk aan 3 [63]. Enerzijds moet de vochthoeveelheid in het dakcomplex beperkt worden door:

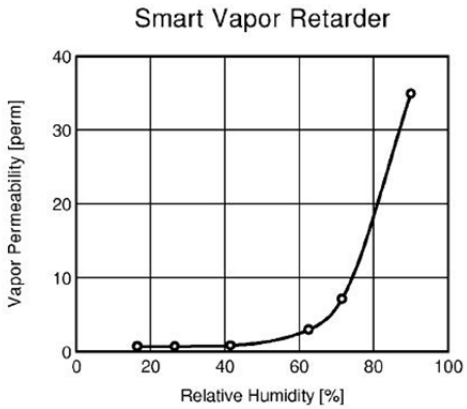
- De thermische isolatie en de damprem onmiddellijk na elkaar aan te brengen en tijdens de werkzaamheden te vermijden dat de relatieve luchtvochtigheid van het binnenklimaat hoger oploopt dan 75 % door de ruimten voldoende te verwarmen en te verluchten (zeker in de winter).
- De dakvloer droog te houden. Hierbij zou het houtvochtgehalte beperkt moeten worden tot 18 % bij de plaatsing.
- De kwaliteit van de uitvoering van de damprem en de aansluitingen te controleren met behulp van een luchtdichtheidstest.

Anderzijds moet de uitdroging van het dakcomplex gestimuleerd worden door:

- Een dampopen en vezelig isolatiemateriaal te gebruiken (geen kunststofschuimen).
- De zon te gebruiken om de dakafdichting op te warmen (schaduw vermijden, enkel donkere afdichtingsmembranen gebruiken, geen terrasdaken, geen groendaken, …). Dit is noodzakelijk om de temperatuur in de bovenzijde van het dakcomplex zo hoog mogelijk op te drijven en het drogingspotentieel zo groot mogelijk te maken.
- Een minimale dakhelling van 2 % te handhaven voor het platte dak om aldus plasvorming te beperken. Plasvorming kan het dakoppervlak immers doen afkoelen.
- Geen dampdichte afwerkingsmaterialen langs de binnenzijde tegen het plafond aan te brengen. De voorkeur gaat uit naar gipskartonplaten boven OSB- of multiplexplaten [63].

VOCHTGESTUURDE DAMPREM

Gedurende de verwarmingsperiode (winter) gedraagt de vochtgestuurde damprem zich als een conventionele damprem langs de binnenzijde van de constructie waar het vochtgehalte doorgaans laag is. Alhoewel, wanneer het zich langs de buitenzijde van de constructie bevindt, waar de dampdruk hoger is, kan het even doorlatend worden als bijvoorbeeld pleisterwerk. In onderstaande figuur wordt de damppermeabiteit uitgezet tegenover de omgevende relatieve vochtigheid, aan de hand van cuptests uitgevoerd door Künzel [55].



FIGUUR 23 - DAMPPERMEABILEIT VAN DE VOCHTGESTUURDE DAMPREM IN FUNCTIE VAN DE RELATIEVE VOCHTIGHEID [77].

Een hoge, langdurige luchtvochtigheid binnen kan tijdens de winterperiode de condensatierisico's echter vergroten (de damprem zet zich m.a.w. open en het damptransport is naar het plat dak gericht). Dit kan het geval zijn in minder goed geventileerde woningen met een hoge bezetting en/of interne vochtproductie.

Tijdens de zomer is de situatie verschillend. Door de hogere buitentemperaturen en in vele gevallen ook door de zonnestraling zal de temperatuur aan de buitenzijde van de dakopbouw toenemen. De dampdruk zal hierdoor stijgen zodat een deel van het vocht, dat tijdens de winterperiode in de bovenkant van het dak geaccumuleerd werd, vrijkomt en naar de binnenkant van het dak migreert. Daardoor zal de dampdruk aan de buitenzijde van de damprem oplopen en zal er zich, niettegenstaande dat de dampdruk binnenshuis in vele gevallen hoger zal zijn dan tijdens de wintermaanden, een dampdrukverschil over de damprem instellen waarbij vocht van in het dak naar de binnenruimte gaat diffuseren. Hierdoor kan het dak (gedeeltelijk) uitdrogen [20].

Voor een goede werking van de dakopbouw is men volledig afhankelijk van de goede werking van de damprem: deze dient in de winterperiode voldoende dampdicht te zijn om vochttoetreding in het dakcomplex te beperken en in de zomerperiode voldoende dampopen om droging toe te laten.

Hoger werd reeds vermeld dat een goede vochtstrategie op 3 fronten dient in te werken. Bij goede uitvoering zal bij dit daktype hieraan voldaan zijn [20]:

- Beperken van de vochtinbreng: De hogere μd -waarde in droge omstandigheden zal de vochtinbreng door diffusie beperken. Belangrijk is dat het initieel vochtgehalte laag gehouden wordt en dat convectie tot een minimum beperkt wordt door de nauwkeurige plaatsing van de damprem.
- Beperken van de gevolgen van vochtaccumulatie: De hout-gebaseerde dakvloer en de houten roosteringsbalken kunnen op een veilige manier een zekere hoeveelheid vocht bufferen. Door gebruik van hygroscopische isolatie zoals cellulosevlokken wordt deze vochtaccumulatie-capaciteit van het dak nog vergroot.
- Zorgen voor voldoende uitdroogmogelijkheid: Gebruik van een vochtgestuurde damprem in plaats van een klassieke damprem leidt tot een verbeterde uitdroging tijdens de zomermaanden.

4. EERDER ONDERZOEK

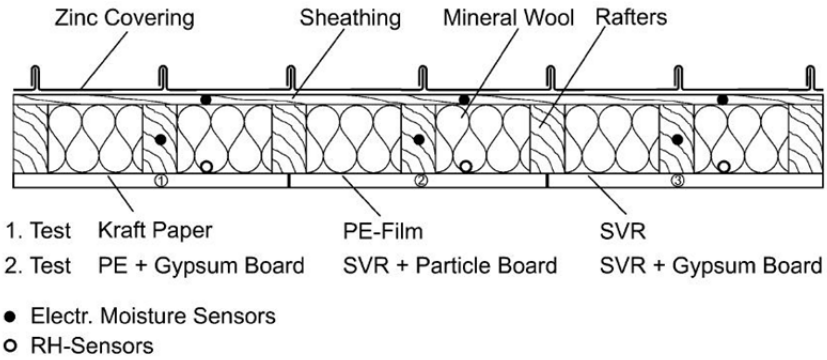
4.1 INLEIDING

In de voorbije jaren zijn al vele uiteenlopende studies gebeurd in dit onderzoeksgebied. Hieruit kunnen vele lessen getrokken worden om verder onderzoek te sturen. In dit hoofdstuk zullen enkele toonaangevende/interessante werken uitgelicht worden en verder besproken.

4.2 KÜNZEL IN HOLZKIRCHEN

Onder Künzel werden er aan het Fraunhofer-Instituut voor Bouwfysica vele experimenten en simulaties uitgevoerd. Een eerste was om het positieve effect van een vochtgestuurde damprem aan te tonen, in hellende daken met een dampdichte buitenbekleding. Hiervoor werd in 1998 een veldproef opgesteld, die dan verder door WUFI-simulaties onderzocht en vergeleken kon worden.[5] [6]

De proef bestond uit een hellend dak, onder een hoek van 50°, volledig gevuld met isolatie en niet geventileerd. De testsite bevindt zich in Holzkirchen, dicht tegen de Alpen op een hoogte van 680 m boven zeeniveau. Een veel voorkomende vochtbron in dit daktype is het initiële vocht in de houten spanten en dakbeschot onder de dakafdichting. Hiervoor werden balken gebruikt die nog niet volledig uitgedroogd waren, en werd het dak enkele uren besproeid met water (simulatie regenval gedurende de opbouw) alvorens de dampdichte, zinken dakbedekking te plaatsen. In het dak werden ook vochtsensoren (adhv elektrische weerstand) en sensoren voor de relatieve vochtigheid ingebouwd.



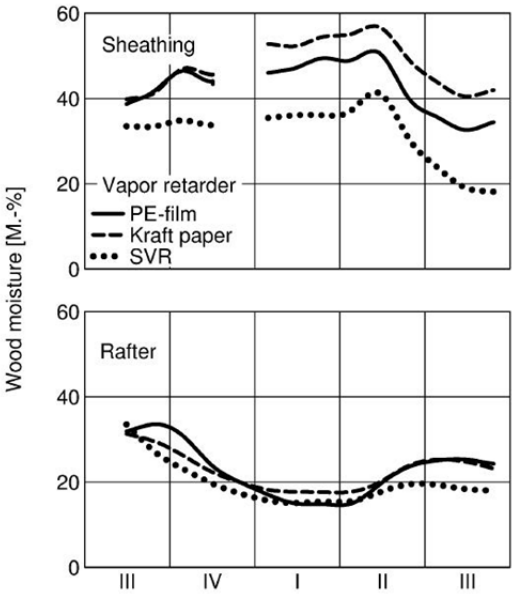
FIGUUR 24 - DOORSNEDE VAN HET GETESTE DAK [54].

De daken werden naar het noorden en zuiden georiënteerd. Het dak werd onderverdeeld in 3 zones, met een eigen binnenafwerking. Gedurende de eerste testperiode hadden de 3 secties ook andere dampschermen: Krafpapier (μd=3m), PE-film (μd=50m) en de vochtgestuurde polyamide damprem. Buiten de eerste herfst, waarbij het uitdrogen van de betonnen vloer tot hoge relatieve vochtigheden leidde, werd het binnenklimaat tussen 20°C, 40% RV in de winter en 23°C, 60% RV in de zomer gehouden.

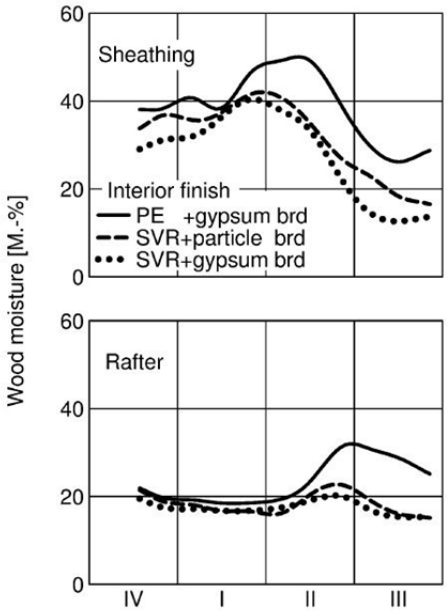
De zuidgerichte testsecties droogden zeer snel uit. Het initiële vochtgehalte van de houten beplanking zat reeds onder de kritische 20 M% na het plaatsen van de zinken dakbedekking en het starten van de metingen. Ook het vochtgehalte in de spanten zakte zeer snel, onafhankelijk van de gebruikte damprem. De uitdroging naar binnenuit verloopte zo snel dat er omgekeerde condensatie tegen de dampremmen optrad, wat tot schimmelvorming op het kraftpapier leidde.

[5] **Künzel, H.M.**, Bedeutung von Klimabedingungen und Diffusionseigenschaften für die Feuchtesicherheit voll gedämmter Altbaudächer, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1998. [53]
[6] **Künzel, H.M.**, Flexibel vapor control solves moisture problems of building assemblies – Smart Vapor Retarder to replace the convetional PE-film, J. Thermal envelope & Building science, Vol. 23 (p. 95-102), 1999. [54]

In de noordgerichte daksecties werd geen zomercondensatie opgemerkt, dit omdat de temperaturen van de dakbedekking veel minder hoog opliepen. Hier verloopt de uitdroging van het dakbeschot en de spanten veel trager. Het vochtgehalte in de spanten bij de vochtgestuurde damprem blijft onder de kritische 20 M%, terwijl deze bij de andere secties stijgt tot 25 M% tijdens de volgende zomer. Dit is te verklaren door een herverdeling van het vocht in de dakopbouw. Enkel bij de vochtgestuurde damprem is het vochtgehalte in zowel de beplanking als de spanten voldoende laag aan het einde van de testperiode.



FIGUUR 25 - VOCHTGEHALTE IN HET DAKBESCHOT EN DE SPANTEN GEDURENDE DE EERSTE TESTPERIODE [54].



FIGUUR 26 - VOCHTGEHALTE IN HET DAKBESCHOT EN DE SPANTEN GEDURENDE DE TWEEDE TESTPERIODE [54].

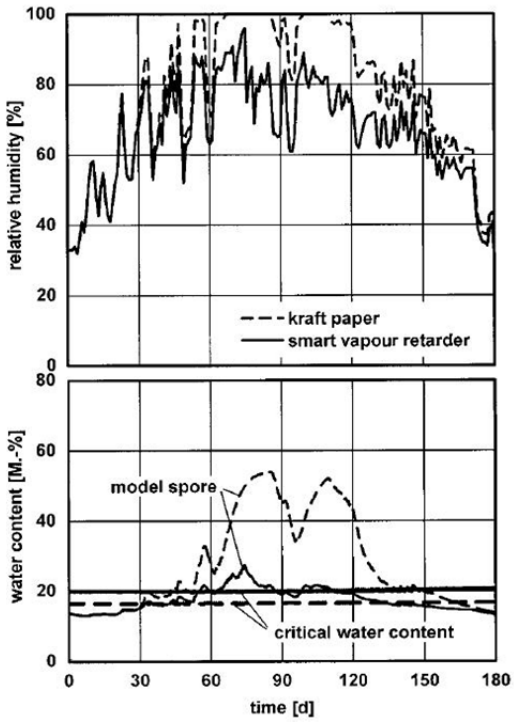
Voor de tweede testperiode werd het initiële vochtgehalte in de dakopbouw weer op gelijke hoogte gebracht. In deze test werd het effect van de binnenafwerking bekeken. Het vochtgehalte bij de vochtgestuurde damprem daalt al zeer snel, met een klein voordeel voor het gipskarton tegenover de spaanplaat. Bij de PE-folie blijft het vochtgehalte boven de kritieke waarde van 20 M%. Wanneer de oppervlaktetemperatuur van het dak boven de binnentemperatuur uitstijgt, zal de dampstroom keren en kan het vocht uit het dakbeschot leiden tot condensatie op het dampscherm. Echter, wanneer het dampscherm zich opent, zal het vocht verdampen naar de binnenruimte en treedt er geen condensatie op. Dit geldt voor het vochtgestuurde dampscherm en het gipskarton. Wanneer de spaanplaat toegepast wordt, zal dit de weerstand tegen damptransport verhogen en is er een mogelijkheid op condensatie in het dak.

Dit onderzoek bewijst de goede werking van de vochtgestuurde damprem, en de overeenkomst tussen de simulaties en het veldonderzoek. Deze studie op hellende daken is ook interessant voor de toepassing op platte daken, omwille van de dampdichte buitenbekleding die gebruikt werd. Ook Sedlbauer zal verder op dit daktype werken om zijn bio-hygrothermisch model voor schimmelgroei te testen.[7]

Hierbij wordt enkel onderscheid gemaakt tussen het kraftpapier en de vochtgestuurde damprem. Het vochtgehalte en mogelijkheid tot schimmelgroei werd berekend met het WUFI-simulatieprogramma. De temperatuur aan het binnenoppervlak was nagenoeg constant 21°C. Deze waarden werden verder gebruikt in

[7] **Sedlbauer, K. ea.**, A new model for mould prediction and its application on a test roof, International Scientific Conference on 'The current problems of building-physics in the rural building', Cracow, 2001. [49]

stap 2: Het vochtgehalte in de spoor. De waarden voor het kraftpapier liggen beduidend hoger dan de vochtgestuurde damprem, er worden zelfs waarden boven 50 M% gehaald. Het startpunt voor ontkieming ligt anders voor beide dampschermen. Door de constante temperatuur is er bijna geen verandering in de tijd. Bij het kraftpapier start de schimmelgroei na 30 dagen. Bij de PA-folie wordt de limiet slechts kortstondig overschreden en is er geen risico op schimmelgroei.

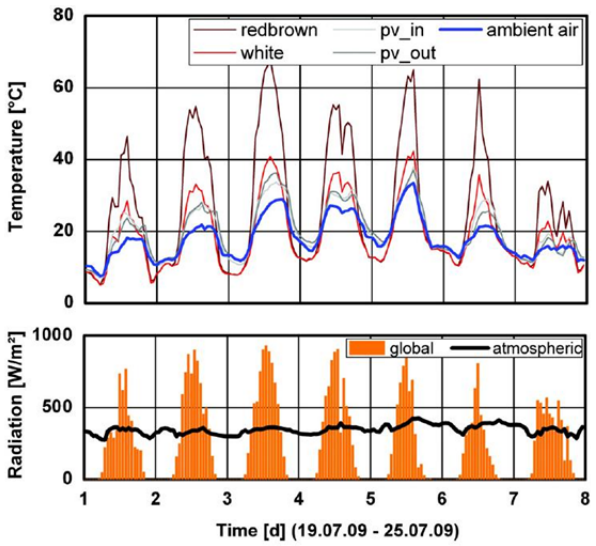


FIGUUR 27 - BOVEN: RELATIEVE VOCHTIGHEID OP DE DAMPSCHERMEN. ONDER: WATERGEHALTE IN DE SPOREN EN LIMIETWAARDES VOOR ONTKIEMING [49].

Een later onderzoek werd gevoerd door Bludau, Künzel en Zirkelbach [8]. Het doel van de studie was de invloed te begroten van beschaduwing van het dakoppervlak, een wit dakoppervlak en de latente warmte. De resultaten uit de simulaties werden dan vergeleken met de werkelijk gemeten waarden. De opbouw van het dak is anders dan het compacte dak: het dampscherm (aluminium-folie, Sd > 1500m) ligt op het dakbeschot, dat de constructie draagt. Alvorens de constructie te sluiten, werd de isolatie (glasvezel) besproeid met water (2L/m²). De metingen begonnen in Augustus 2006. Na een testperiode van 2 jaar werd een deel van de dakbedekking in het wit overschilderd en een zonnepaneel geplaatst op de donkere dakafdichting[9].

[8] **Bludau, C., Künzel, H.M., Zirkelbach, D.**, Hygrothermal performance of flat roofs with construction moisture, ASHRAE Buildings XI, 2010. [3]

[9] In de simulaties werd een kort-golvige absorptiecoëfficiënt van 0,9 voor het donkere dakmembraan gebruikt, en voor de witte dakafdichting 0,2, wat door veroudering van het materiaal kan oplopen tot 0,3.



FIGUUR 28 - GEMETEN DAKOPPERVLAKTEMPERATUREN EN STRALING VERGELEKEN MET LUCHTTEMPERATUUR GEDURENDE EEN WEEK IN JULI [3].

De temperaturen op het donkere dakoppervlak lopen veel hoger op dan bij het witte dak of wanneer geen direct zonlicht invalt (onder een zonnepaneel). 's Nachts zakt de temperatuur onder deze van de lucht, omwille van de langgolvige straling naar de atmosfeer. Uit verdere berekeningen van de verzadigingsdampdruk in het dak blijkt de temperatuur van het dak van cruciaal belang te zijn voor het uitdrogen van het dak, en bij lichte dakbedekkingen of beschaduwde zones lager. Bij constructies die naar binnen dienen uit te drogen, compacte platte daken, kan dit zorgen voor problemen door vochtaccumulatie, gevolgd door houtrot.

4.3 Derome in Montreal

Aan de Concordia University in Montreal werd een serie van laboratoriumproeven uitgevoerd, gebruikmakend van een grootschalige klimaatkamer. Er werden 2 modellen opgesteld op basis van de typische platte daken van woningen gebouwd in Montreal tussen 1930 en 1970. Het doel was om na te gaan of er geen vochtrisico optrad na het vullen van de holtes tussen de spanten met cellulosevezels, en de mogelijke verbetering van de thermische performantie[10].

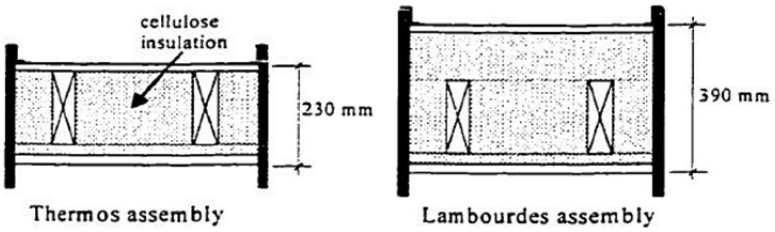
Er werd overwogen een veldonderzoek te doen, maar de modellen voor vocht- en luchttransport en vochtopslag volstonden niet voor dit toepassingsgebied. Er werd besloten een experiment op ware grootte uit te voeren om de impact van variabelen te kunnen bepalen. Hiervoor werd ook een nieuwe testprocedure ontwikkeld. Hierin zat ook het 'exposure level' van een constructie, afhankelijk van de temperatuur, vochtomstandigheden en tijdsduur, om de resultaten te evalueren.

- Moderate level of exposure: Vochtgehalte tussen 20% en 25% voor temperaturen boven 10°C en een vochtgehalte boven 20% voor temperaturen tussen 0°C en 10°C.
- High level of exposure: Vochtgehalte boven 25% en temperaturen tussen 10°C en 40°C.

Uit een database van ong 500 gebouwen werden 2 modellen vooropgesteld: Een *thermos* en *lambourdes* type. Er werden 2 reeksen van telkens 5 proefdaken opgesteld, met verschillende luchtexfiltratiepaden. Tijdens de

[10] **Derome, D.**, Moisture occurence in roof assemblies containing moisture storing insulation and its impact on the durability of building envelope, PhD. Thesis. - Department of Building, Civil and Environmental Engineering - Concordia University, 1999. [14]

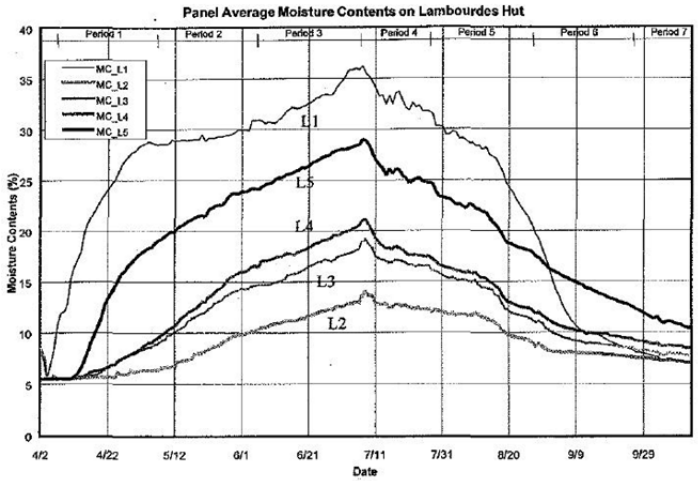
meetcampagne werd één bevochtiging-drogingscyclus opgelegd, met licht hogere waarden dan in werkelijkheid.



FIGUUR 29 - DOORSNEDE VAN DE DAKOPBOUW [14].

Het bevochtigingsseizoen werd ingekort tot 3 maanden door de luchtvochtigheid te verhogen, zonder een niet-realistische scenario te creëren. De drogingscyclus werd niet ingekort. Om het vochtgehalte van de constructie te onderzoeken werden 3 onderzoekswijzen uitgewerkt: Meting van het vochtgehalte in het hout adhv elektrische weerstand, meting van de relatieve vochtigheid in de cellulosevezels en gravimetrie op proefstukken uit de beplanking, spanten en isolatievezels.

De test liep zonder onderbreken voor 190 dagen. In onderstaande figuur wordt het vochtgehalte in de houten beplanking getoond voor de hele testcyclus. Alle proefdaken waren uitgedroogd op het einde van de droogperiode, wat aantoont dat er geen vochtaccumulatie is na een volledige doorloping van de cyclus. Bij het bekijken van de 'exposure levels' krijgt men een ander inzicht in de verschillende opbouwen. Vele van de geteste dakconstructies zijn langtijdig blootgesteld aan hoge vochtgehaltes (>25 M%). Deze voorstelling van data geeft een goede parameter voor het blootstellingsrisico aan vocht voor een bepaalde dakopbouw [21] (zie TOW: *Time of Wetness)*.



FIGUUR 30 - GEMIDDELDE VOCHTGEHALTE IN DE BEPLANKING IN DE LAMBOURDES HUT [21].

Enkele eerder veronderstelde zaken worden bevestigd in dit onderzoek: de negatieve invloed van luchtlekkage in de opbouw van het dak en de schimmelweerstand van cellulose-isolatie. Vele conclusies kunnen verder niet gemaakt worden, aangezien één bevochtiging-drogingscyclus te kort is om verdere ontwikkeling te kunnen inschatten. Ook de impact van vochtpenetratie in het dak werd niet beschouwd. Vooral de proefopstelling en meetprocedure zijn een voorbeeld voor verder onderzoek.

4.4 Rapport Janssens voor IsoproC

In 2003 werd aan Prof. A. Janssens van de Universiteit Gent gevraagd een numerieke studie te voeren naar het hygrothermisch gedrag van een koud daksysteem in opdracht van de firma isoproC[11]. De simulaties werden uitgevoerd met behulp van het rekenprogramma 2DHAV. Dit berekent het gecombineerde warmte-, lucht- en waterdamptransport in bouwconstructies en voorspelt het verloop van temperaturen, warmtestromen, dampdrukken en vochtgehaltes in functie van tijd onder invloed van de wisselende randvoorwaarden van buiten- en binnenklimaat.

Het dak wordt ééndimensionaal berekend en wordt opgebouwd uit:

- Dakafdichting in EPDM: 1,5 mm (µd = 100m)
- Draagvloer uit OSB-platen: 18 mm
- Cellulose-isolatie: 360 mm
- Dampscherm: 0,23 mm (3 varianten)
- Leidingenspouw
- Gipskarton: 12 mm

Het vochtgedrag wordt bekeken voor 3 verschillende dampschermen, 2 vochtregulerende dampremmen en een standaard kunststoffolie:

- Pro clima DB+: $\mu d = 1/(5{,}73\,.\,10^{-5} + 1{,}7\,.\,10^{-7}\exp(9{,}3\,.\,\varphi))$
- Pro clima DB+SPEZIAL: $\mu d = 1/(1{,}4\,.\,10^{-5} + 6{,}2\,.\,10^{-9}\exp(12{,}5\,.\,\varphi))$
- PE-folie: $\mu d = 10m$

De benodigde materiaaleigenschappen werden uit bestaande literatuur gehaald en rapporten van de firma isoproC. Voor het buitenklimaat werden waarden van TRY Ukkel gebruikt, voor het binnenklimaat werd zowel klimaatklasse 2 als 3 bekeken. Dit resulteert in 6 verschillende varianten. Bij de beoordeling van het vochtgedrag werden twee criteria geëvalueerd: De mogelijkheid van het aanwezige vocht om uit te drogen en het risico op biologische degradatie. Deze tweede voorwaarde heeft betrekking op de OSB-plaat, die aan de hoogste vochtgehaltes onderworpen wordt. Bij elke simulatie werd het aantal uren berekend waarbij het meest kritische punt in de OSB-plaat aan bepaalde condities van temperatuur en vochtigheid is blootgesteld (zie [21]):

- $TOW_{20/5}$: Aantal uren met zowel een vochtgehalte hoger dan 20 M% en temperatuur boven 5°C. Deze toestand mag zich niet langer dan een maand per jaar voordoen: $TOW_{20/5}$ < 720h/jaar.
- $TOW_{25/10}$: Aantal uren met zowel een vochtgehalte hoger dan 25 M% en temperatuur boven 10°C. Deze toestand mag zich niet langer dan een week per jaar voordoen: $TOW_{25/10}$ < 168h/jaar.

Ook het gecumuleerde vochtgehalte M_{tot} (kg/m²) en het maximaal weekgemiddeld vochtgehalte u_{max} (M% kg/kg) werd bekeken in de simulatie over 4 jaar. Uit de studie blijkt dat het veronderstelde binnenklimaat een bepalende factor is om een veilige dakoplossing af te leiden. De onderzochte dampschermen zorgen elk voor een veilige oplossing, zolang het dak tot binnenklimaatsklasse 2 behoort. Bij een vochtiger binnenklimaat (BKK3) zorgt enkel dampscherm 'pro clima DB+SPEZIAL' voor een voldoende snelle uitdroging.

Deze beoordeling ging uit van een beginsituatie met een relatief droge beboarding (15 M%). In de bouwpraktijk en ons huidig klimaat is het niet uitgesloten dat deze waarde hoger oploopt. Een verdere bereking toont aan dat bij hogere initiële vochtgehaltes ook dit dampscherm niet voldoet. Het belang van een droge beboarding is dus zeer groot. Een waarde van 17,5 M% komt uit de berekeningen naar voor als grenswaarde om ook in het eerste jaar een veilige vochthuishouding te garanderen.

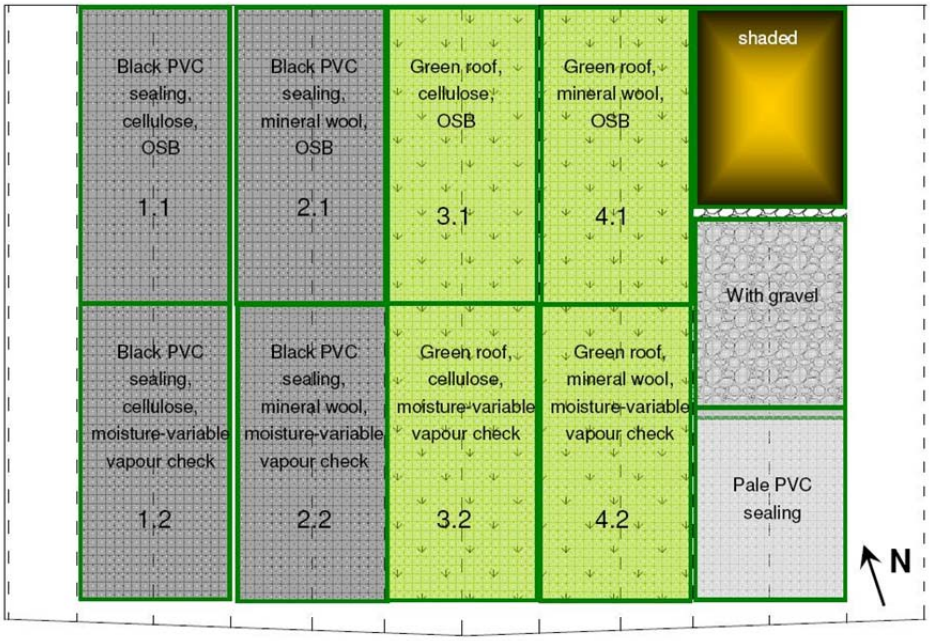
[11] **Janssens, A.**, Hygrische studie koud dak met cellulose-isolatie, Universiteit Gent, 2003. [36]

Uit deze studie blijkt de gevoeligheid aan werf- en uitvoeringsomstandigheden. Een controle van het vochtgehalte van de beboarding is hierbij aangewezen, alsook een luchtdichtheidstest. Convectie en beschaduwing werden hier niet beschouwd, toch is het niet gemakkelijk de voorwaarden te halen voor een binnenklimaatsklasse 3. Ook de invloed van houten dakspanten is hieruit niet af te leiden. Er werd een ééndimensionale simulatie uitgevoerd, echter een tweedimensionale opbouw is hiervoor beter geschikt. Het belang van verder onderzoek wordt in deze studie nog eens aangetoond.

4.5 Winter ea. in Leipzig

Het 'Leipzig Institute for material research and testing '(MFPA Leipzig) en de 'Munich Technical University' (TU Munchen) voerden van september 2007 tot maart 2009 een uitgebreid onderzoek naar het compacte dak. [12] Het verzamelen van data en kennis over het hygrothermisch gedrag van niet-geventileerde platte daken adhv veldexperimenten stond hierbij voorop. Op basis van deze experimenten werden bijkomende simulaties uitgevoerd via WUFI, om de grenzen van dit constructietype verder af te tasten en verschillende randvoorwaarden te vergelijken.

In Leipzig werd een testwoning opgebouwd met een dakopbouw, onderverdeeld volgens damprem, isolatiemateriaal en dakdichting. In onderstaande figuur worden deze weergegeven.



FIGUUR 31 - VARIATIES IN DAKOPBOUW VAN DE TESTWONING IN LEIPZIG [90].

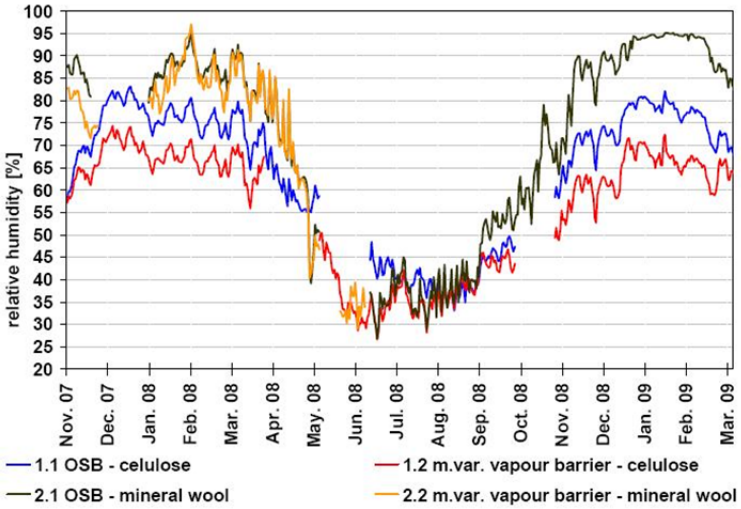
[12] **Winter, S., Fülle, C. & Werther, N.**, Experimentelle und numerische Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens von flach geneigten Dächern in Holzbauweise mit oberer dampfdichter Abdichtung unter Einsatz ökologischer Bauprodukte zum Erreichen schadensfreier, markt- und zukunftsgerechter Konstruktionen, Fraunhofer IRB Verlag, 2009. [89]

De volgende metingen werden uitgevoerd:

- Buiten- en binnenklimaat
    - Temperatuur en relatieve vochtigheid van buitenlucht
    - Windrichting en –snelheid
    - Regenval
    - Globale straling
    - Temperatuur en relatieve vochtigheid van binnenlucht
- Hygrothermische condities in de dakopbouw
    - Temperatuur onder de dakafdichting
    - Temperatuur en relatieve vochtigheid in de kritische doorsnede (tussen OSB-plaat en isolatie)
- Vochtgehalte
    - Vochtgehalte in de houten spanten en OSB-platen

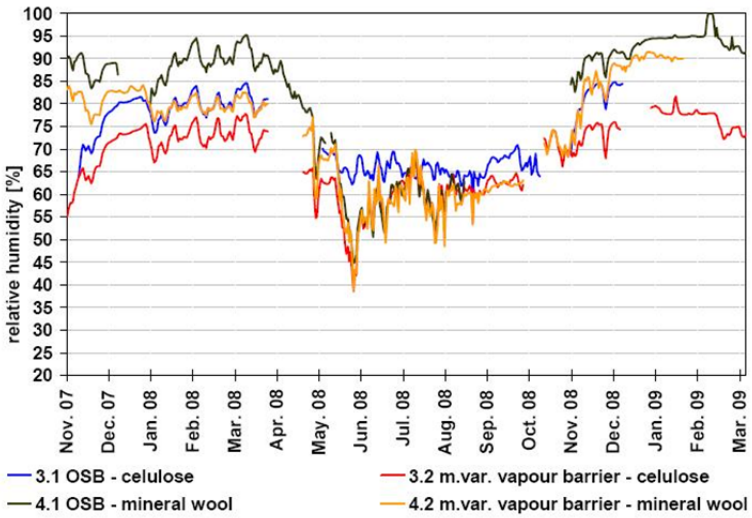
Voor de evaluatie van de resultaten gaan ze er vanuit dat het vochtgehalte in de OSB-platen niet hoger mag zijn dan 18 M% en in de spanten 20 M% voor een langere periode. Om schimmelgroei te vermijden willen ze de relatieve vochtigheid in de kritische zone, tussen OSB-plaat en isolatie, beperken tot 80%.

Net zoals bij Bludau [3] leidt een lichtere dakafdichting of beschaduwing (groendak) tot lagere oppervlaktetemperaturen van de dakbedekking, maar vermindert deze ook de uitdrogingscapaciteit van het daksysteem. Bij de vergelijking tussen de isolatiematerialen stelt men vast dat de cellulose-isolatie de relatieve vochtigheid doet dalen in de kritische zone, onafhankelijk van de dakbedekking. In de winter komt de relatieve vochtigheid zelfs 15% lager te liggen in vergelijking met minerale wol. Dit is een gevolg van de grotere vochtopslagcapaciteit van de cellulosevezels. Dit vocht kan dan in de zomer afgegeven worden aan de binnenomgeving.



FIGUUR 32 - RELATIEVE VOCHTIGHEID TUSSEN DE BOVENSTE OSB-PLAAT EN DE ISOLATIE VOOR VELDEN MET EEN ZWARTE PVC-DAKAFDICHTING [90].

Uit bovenstaande grafiek blijkt ook het positieve effect van vochtafhankelijke dampschermen, in vergelijking met een OSB-plaat als damprem. De velden met een groendak tonen ook hogere vochtgehaltes in vergelijking met niet-bedekte velden, veroorzaakt door het verminderde uitdrogingspotentieel. In november 2009 zat de variant met minerale wol reeds aan een waarde van 85% RV in de kritische zone. Enkel bij de variant van cellulose-isolatie en een vochtgestuurde damprem vertoont het groendak geen risicogedrag.



FIGUUR 33 - RELATIEVE VOCHTIGHEID TUSSEN DE BOVENSTE OSB-PLAAT EN DE ISOLATIE VOOR VELDEN MET EEN GROENDAK [90].

Het vochtgehalte in de houten spanten blijft voor alle variaties onder de kritische 20 M%; bij een initieel vochtgehalte van 15 M%. De gemeten waarden vertonen een grote correlatie met de numerieke simulaties die uitgevoerd werden. Op basis van het veldonderzoek werden verschillende hygrothermische simulaties (parameterstudies) uitgevoerd:

- Variatie van het buitenklimaat
- Variatie van het binnenklimaat (hogere relatieve vochtigheden)
- Vochtinbreng door convectie (50, 150 en 250 g/m²)
- Variatie van de buitenafdichting (PVC tot bitumen)
- Simulatie met beschaduwing van aangrenzende gebouwen
- Simulatie met structuren op het dak (zonnepanelen)

De invloed van deze factoren is zeer beperkt en verhoogt het vochtgehalte slechts met enkele percenten. Ook worden sommige opties niet verder onderzocht, zoals bv het groendak met minerale wol. De studie besluit met het feit dat compacte houten platte daken mogelijk zijn zonder risico's, wanneer aan bepaalde randvoorwaarden voldaan wordt. De opzet was ook het aftasten van de limieten, dit is gebeurd, maar kan nog verder onderzocht worden. De volgende varianten worden als veilig beschouwd:

- 1.1 Zwarte PVC dakafdichting – OSB – Cellulose – OSB
- 1.2 Zwarte PVC dakafdichting – OSB – Cellulose – Vochtgestuurde damprem
- 2.2 Zwarte PVC dakafdichting – OSB – Minerale wol – Vochtgestuurde damprem
- 3.2 Groendak – OSB – Cellulose – Vochtgestuurde damprem

Voor variant 2.1 (Zwarte PVC dakafdichting – OSB – Minerale wol – OSB) moeten verdere studies uitgevoerd worden. En volgende mogelijkheden worden als onvoldoende beschouwd:

- 3.1 Groendak – OSB – Cellulose – OSB
- 4.1 Groendak – OSB – Minerale wol – OSB
- 4.2 Groendak – OSB – Minerale wol – Vochtgestuurde damprem

Verder worden nog enkele conclusies getrokken uit het materiaalgebruik in dit onderzoek, zoals welke materialen een voorkeur hebben op andere. Zo wordt het gebruik van een absorberend isolatiemateriaal, cellulosevezels, aangeraden, omwille van het buffereffect voor vocht. Zo wordt het effect van vochtinfiltratie door convectie of bouwvocht verzacht voor de constructie. Ook het positieve effect van de vochtgestuurde

damprem wordt nogmaals bewezen, ten voordele van de OSB-plaat als damprem (maar dit blijkt in sommige gevallen ook mogelijk). De zwarte PVC-dakafdichting, met een relatief lage dampdiffusieweerstand ($\mu d \approx$ 20m), vertoont zowel hygrische als thermische voordelen tegenover de lichtere dakafdichting, alsook een bitumen dakafdichting met een hogere dampdiffusieweerstand ($\mu d \approx$ 300m). Een snelle en goede luchtdichtheid zorgt voor minder convectie en een minder hoog initieel vochtgehalte. Ook het vermijden van holtes in de dakopbouw vermindert het transport van lucht en vocht door convectie [90].

Toch is het belangrijk deze conclusies te nuanceren. De testperiode verliep over een redelijk korte periode en het is moeilijk in te schatten hoe de dakconstructie tijdens een volgende bevochting-drogingscyclus zal reageren. Ook het belang van het initiële vochtgehalte is niet te onderschatten, zoals reeds eerder bewezen [36], en zal het al-dan-niet veilig verklaren van enkele varianten sterk beïnvloeden. De oveereenstemming tussen de meetresultaten en de simulatie is soms matig, zeker tijdens de zomermaanden. Hier is dus ook een zekere onzekerheid over de nauwkeurigheid van de gemaakte simulaties, aangegeven door de auteurs zelf.

4.6 Geving en Holme

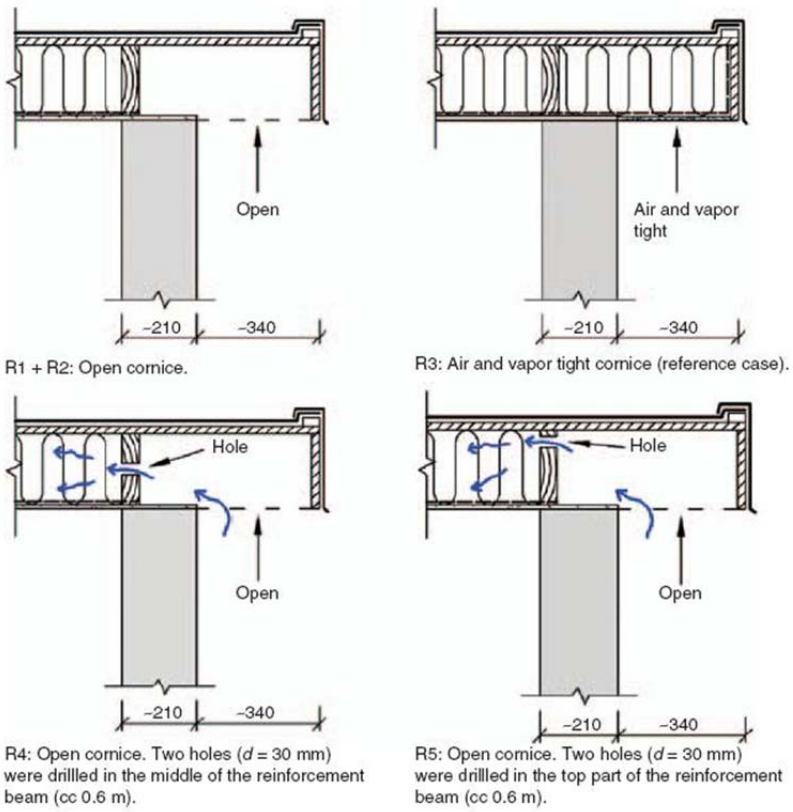
In het kader van het onderzoeksproject 'Climate 2000 – Building constructions in a more severe climate' werd een testhuis opgezet in Trondheim en verschillende metingen uitgevoerd.[13] Hierna werd het onderzoek verdergezet met oa. verschillende hygrothermische simulaties.[14] Zij onderzochten of het beperkte droogpotentieel van een dakconstructie verhoogd kon worden door luchtlekkage van buitenlucht doorheen de isolatielaag, al dan niet opzettelijk. Ze basseerden zich hierbij op het werk van Salonvaara en Nieminen [56], die kleine ventilatiegleuven in de dakopbouw voorzagen.

In het testhuis werd de temperatuur gecontroleerd tussen 16°C en 21°C (in zomer kon deze mogelijks hoger oplopen). De woning werd niet geventileerd of bevochtigd, zodat de relatieve vochtigheid vooral afhing van de temperatuur en de vochtigheid buiten. Deze keuze zal een grote impact hebben op de resultaten van het proefproject. De volgende materiaaleigenschappen werden aangenomen: plywood (μd = 1,34m), PE-folie (μd = 63m) en PVC-dakafdichting (μd = 13m). Om het effect van luchtlekkage/ventilatie te onderzoeken werden verschillende aanpassingen gemaakt aan de dakopbouw.

De metingen werden uitgevoerd over een periode van 2 jaar (jan 2007 tot dec 2008). Bij het begin van de metingen werd een totaal van 17,2 L bouwvocht in de constructie gesproeid, per testsectie, verdeeld over 3 momenten met telkens één week tussen, zodat het vocht zich kon herverdelen binnen het dak. Ook werden schimmelsporen in het dak geplaatst. Simulaties werden uitgevoerd aan de hand van WUFI 1D Pro, waarbij een luchtbron ingebracht kan worden.

[13] **Geving, S., Uvsløkk, S.**, Moisture conditions in timber frame roofs and wall structures – Test house measurements of heat-, air and moisture transfer models, Project report 273, Norwegian Building Research institute, Trondheim, 2000. [24]

[14] **Geving, S., Holme, J.**, The drying potential and risk for mold growth in compact wood frame roofs with built-in moisture, J. of building physics, Vol. 33 (p. 249-269), 2010. [25]



FIGUUR 34 - DOORSNEDE EN BESCHRIJVING VAN DE GEMAAKTE AANPASSINGEN AAN DE DAKOPBOUW [25].

Uit de testresultaten blijkt de ventilatie van het dak wel degelijk een positieve invloed te hebben op het vochtgehalte in het plywood. De overheersende windrichting speelt hierbij ook een rol. De hygrothermische simulaties bevestigen deze waarneming. Wel werd in alle testsecties een schimmelgroei aangetroffen, in verscheidene mate. De vochtgehaltes waren dan ook behoorlijk hoog, zelfs voor de betere opties.

Deze resultaten lijken tegenstrijdig met de conclusies van eerdere onderzoeken. Hun besluit is afhankelijk van verschillende factoren, die toch met ene voorzichtigheid gehanteerd dienen te worden. Zo wordt de testwoning niet bevochtigd, is het klimaat in Noorwegen anders dan bij andere testsites, werd plywood gebruikt tegenover OSB-platen in verschillende eerdere onderzoeken. Ook de hoge vochtgehaltes en opgemerkte schimmelgroei doen vragen rijzen. Maar het meest negatieve aspect is misschien wel de thermische verliezen door deze luchtstromen. De invloed hiervan werd niet mee opgenomen in de studie. Wanneer het dampscherm niet luchtdicht is of slecht geplaatst, zou vochtige lucht vanuit de binnenruimte het dak ingezogen kunnen worden.

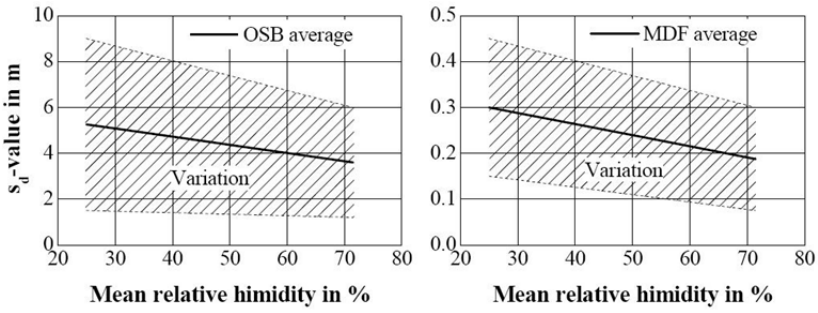
4.7 NUSSER EA.

De Technische Universiteit van Wenen en de Holzforschung Austria (HFA) startten in 2008 een driedelig onderzoeksproject naar houten platte daken: 'Innovative low pitched timber roofs'.[15 16 17] Het onderwerp van deze studie is de invloed van beschaduwing van het dak en het gebruik van verschillende materialen en dampremmen. De bekomen resultaten worden verder gebruikt voor de validatie van het simulatieprogramma HAM3D-VIE en het programma verder uit te breiden voor vochtexfiltratie en herverdeling van het vocht in het dak [67].

Negen verschillende dakopbouwen worden getest in het veldonderzoek. Deze worden geplaatst op 2 verschillende gebouwen. De eerste testopstelling wordt volledig blootgesteld aan de zon (9 opbouwen), de tweede wordt overdekt met een constructie die het dakoppervlak beschaduwd, maar die regenval nog altijd doorlaat (6 opbouwen).

FIGUUR 35 - ONDERZOEKSGEBOUW MET BESCHADUWINGSCONSTRUCTIE [67].

Voor de dakafdichting werd een EPDM-membraan gebruikt, met een diffusieweerstand μd = 87m. Ook een metalen dakafdichting werd getest (al dan niet geventileerd). Voor de dampschermen werden een PE-folie, Pro Clima Intello (grote spreiding) en Pro Clima DB+ (kleine spreiding dampdiffusieweerstand) gebruikt. Ook voor de houtgebaseerde materialen werd rekening gehouden met een veranderende diffusieweerstand [22].



FIGUUR 36 - WATERDAMP DIFFUSIEWEERSTAND VAN OSB EN MDF [22].

[15] **Nusser, B., Teibinger, M., Bednar, T.**, Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvolldämmung — Teil 1: Nicht belüftete Nacktdächer mit Folienabdichtung, Bauphysik Vol. 32 (p. 132–143) ,2010. [64]

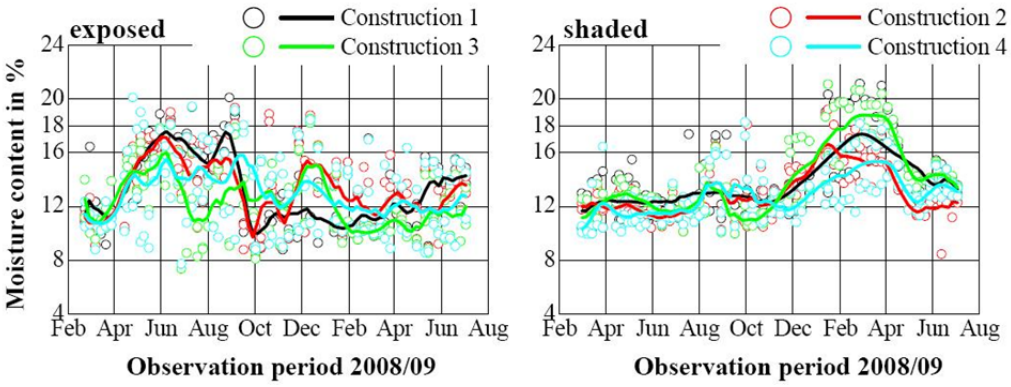
[16] **Nusser, B., Teibinger, M., Bednar, T**., Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvolldämmung — Teil 2: Nicht belüftete, extensiv begrünte Dächer mit Zellulose- und Mineralwolledämmung, Bauphysik Vol. 32 (p. 219–225) ,2010. [65]

[17] **Nusser, B., Teibinger, M. and Bednar, T.**, Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvolldämmung — Teil 3: Hinterlüftete und nicht hinterlüftete Metalldächer, Bauphysik Vol. 32 (p.288–295), 2010. [66]

De metingen werden opgezet in feb 2008 en liepen tot aug 2009 (17 maanden). In april 2008 werd een bevochtigingsperiode bijgeregeld tussen 75-80 % RV. In mei 2008 werd deze verlaagd en in november terug verhoogd tot ongeveer 60% RV. In vergelijking met de Europese standaarden EN ISO 13788 [6] (Vochtigheidsklasse 4) en EN ISO 15026 [7] (Hoge bezetting), valt de dampdruk in de twee testgebouwen tussen de voorwaarden van beide normen. Zij beschouwen de voorwaarden van norm ISO 13788 verder als te hard en bevinden de vochtbelasting in de testruimtes als hoog genoeg.

Voor de dakconstructies met een EPDM-dakbedekking en geen beschaduwing worden gelijkaardige resultaten gevonden, ook in vergelijking met eerder onderzoek [89]. Langs de buitenzijde van de dakholte worden temperaturen tot 76°C gemeten. Hierdoor is er een herverdeling van het vocht naar de binnenzijde van de constructie toe. Dit mechanisme, gestuurd door hoge oppervlaktetemperaturen op het dak, kan hoge vochtigheden veroorzaken op het dampscherm (≥ 80% RV) en zelfs tot zomercondensatie leiden. Tussen de twee verschillende vochtgestuurde dampremmen werd geen verschil opgemerkt.[18]

Ook voor de beschaduwde daksecties (met EPDM-folie) zijn de verschillen klein. De maximumtemperatuur langs de buitenzijde van de dakholte loopt hier wel slechts op tot 40°C. De herverdeling van het vocht in het dak is hierdoor minder groot, alsook de vochtigheid op het dampscherm. Het vochtgehalte in de dakvloer zal hierdoor wel hoger blijven en voor een langere periode. In onderstaande figuur wordt het vochtgehalte in de verschillende dakopbouwen weergegeven. Voor de niet-beschaduwde daken zakt het vochtgehalte vanaf de bevochtigingsperiode in april 2008. Voor de beschaduwde daken daarintegen stijgt het vochtgehalte gedurende de winter 08/09 tot waarden boven de 20 M%.



FIGUUR 37 - VOCHTGEHALTE VAN HET DAKBESCHOT (OSB) VOOR DE DAKOPBOUWEN MET EPDM-FOLIE A/B 1-4 [67].

De temperatuur en het vochtgedrag in de dakopbouw met een groendak is vergelijkbaar met de beschaduwde dakopbouwen, al is er een iets langere vochtige periode (RV ≥ 80%) aan het dakbeschot. Hiernaast worden ook metalen dakbedekkingen onderzocht, maar deze zijn hier minder relevant. Om het risico op schimmelgroei te begroten worden de periodes met de juiste voorwaarden (afhankelijk van temperatuur en relatieve vochtigheid [31]) procentueel uitgedrukt tegenover één jaar. De hoogste waardes worden bekomen voor het dakbeschot bij groendaken (25,7%) en de binnenzijde van een niet-beschaduwd dak met EPDM-folie (19,0%). Na de studie werden alle daken geopend, maar nergens werd enige schimmelgroei aangetroffen. Het risico werd misschien wel overschat, net als in vorige studies [25].

In deze studie met een hoge vochtbelasting komen hoge temperaturen voor met hoge relatieve vochtigheden. Waar deze dakopbouwen (EPDM-folie + bezonning) op het eerste zicht zeer veilig lijken, kan de vochtherverdeling in het dak tot condensatie leiden op de damprem tijdens de zomermaanden. Als isolatiemateriaal werd hier minerale wol gebruikt, terwijl vorige studies het positieve effect van cellulosevezels

[18] In het rapport van Janssens maakt de keuze tussen Pro clima DB+ en Pro Clima DB+SPEZIAL juist wel het verschil om te voldoen aan de vooropgestelde eisen [36].

reeds aanhaalden [90]. Desondanks werd geen schimmelgroei aangetroffen. Minerale wol blijft dus ook tot de mogelijkheden behoren. De verschillen bleven over het algemeen zeer klein tussen resultaten van verschillende materialen, zoals bij de vochtgestuurde damprem of OSB/MDF. Dit kan te verklaren zijn door de redelijk korte observatieperiode (17 maanden) en de grote invloed van het initiële vochtgehalte.

4.8 SAMENVATTING

De voorbije jaren zijn al enkele studies uitgevoerd binnen dit onderzoeksgebied, die de werking en veiligheid van het compacte platte dak onderzochten. Hierbij werden zowel hygrothermische simulaties als veldproeven uitgevoerd, en de overeenstemming tussen beiden was meestal vrij goed. Uit deze onderzoeken werden verschillende conclusies getrokken, rond materiaalgebruik, beschaduwing, klimaatsrandvoorwaarden, schimmelgroei en de veiligheid van de constructie. Soms werd de betrouwbaarheid van enkele opstellingen in vraag gesteld, maar nooit het compacte dak zelf of werd er ernstige schade gemeld. Er zijn dus zeker toepassingsmogelijkheden en een toekomst voor dit daktype, al is verder onderzoek nodig.

Niet alle onderzoeken hielden rekening met convectie en de mogelijke vochttoename hierdoor. Derome [14] en Geving & Holme [25] onderzochten dit verder, maar kwamen niet tot éénduidige resultaten. Winter [89] bracht convectie in rekening door een extra vochtbron toe te voegen binnen enkele simulaties. Ook het positieve effect van de cellulosevezels op het verminderen van convectie, en het tijdelijk bufferen van vocht is nog niet duidelijk. De invloed van luchtlekken is hierbij ook moeilijk te kwantificeren. De kleur van het dakmembraan werd in vele studies mee opgenomen en leidde tot gelijkaardige conclusies: Een lichtere dakbedekking verlaagt de oppervlaktetemperatuur en zo ook het uitdrogingspotentieel [3],[89]. Nusser [67] plaatst hierbij wel duidelijk een kanttekening, het effect van zomercondensatie. De vochtgestuurde damprem, Künzel [55], blijft in de daaropvolgende onderzoeken volledig overeind en is een meerwaarde voor verdere toepassingen. Het gebruik van een PE-folie voldoet slecht in enkele gevallen en is niet altijd betrouwbaar [36],[64]. Janssens [36] benadrukt het belang van het initiële vochtgehalte, wat ook in andere onderzoeken een doorslaggevende factor kan zijn, zonder dat er verder wordt op ingegaan.

Het buitenklimaat is voor ieder onderzoek anders, het is belangrijk deze tests onder verschillende omstandigheden uit te oefenen, maar ook het binnenklimaat is dat. De meeste testgebouwen werden niet bewoond, maar het is onduidelijk of deze genoeg werden verwarmd en bevochtigd. Hierrond werd in de verschillende studies geen concensus bereikt. Bij Derome [21] werd deze wel volledig vastgelegd en constant gehouden binnen de bepaalde testperiodes, Winter [89] hield deze constant over de volledige meetstudie (20°C en 50% RV). Nusser [67] voorzag enkel een bevochtigings- en drogingsperiode. Geving [24] liet deze volledig afhankelijk van de buitenomstandigheden.

Vele onderzoekers haalden in hun conclusies aan dat de onderzoeksperiode en bijhorende metingen vrij kort waren, en een langer onderzoek nodig was om hun gemaakte conclusies te staven. Het belang van de initiële condities werd al aangehaald, maar ook de overeenstemming tussen metingen en simulaties moet hieruit verder blijken.

ONDERZOEKSVRAAG/PROBLEEMSTELLING

Uit de vorige onderzoeken werden een aantal conclusies getrokken rond de veiligheid van verschillende dakopbouwen. Enkele conclusies, zoals het belang van zonnestraling op het dakoppervlak, komen bij ieder onderzoek naar voor en zijn algemeen geldig. Andere conclusies daarentegen zijn specifiek voor een bepaald testmodel, de gebruikte materialen en de heersende randomstandigheden. Het is zeer moeilijk onderzoeken en resultaten met elkaar te vergelijken, daar de opstelling, begincondities en randomstandigheden telkens anders zijn. Zo zullen ook de conclusies van ieder onderzoek niet per se geldig zijn voor de andere onderzoeken en blijven er onzekerheden rondom de veiligheid van de constructie.

In het verdere onderzoek is het de bedoeling één testopbouw, die van een woning te Ronse, op te volgen en op basis hiervan een realistisch computermodel op te stellen in WUFI. Aan de hand van dit model kunnen dan verschillende invloedsparameters getest worden, met als doel de betrouwbaarheid van de dakconstructie te onderzoeken. Hiervoor zullen ook enkele laboproeven uitgevoerd worden op gebruikte materialen in het testdak, om een inschatting te kunnen maken van de hygrische eigenschappen.

Na het uitvoeren van de metingen op het testdak, en de vergelijking met de resultaten van het WUFI-model, volgen enkele onderzoekscases opgebouwd rond 3 belangrijke richtlijnen:

- Vochtinbreng in de constructie verminderen,
- uitdroging van het dak stimuleren en
- het bufferen van een bepaalde hoeveelheid vocht, zonder te leiden tot schade.

Het doel van dit werk is, gebaseerd op de resultaten van de testopstelling en simulatiemodellen, een beter inzicht te krijgen in het hygrothermische gedrag van het compacte platte dak, sommige conclusies uit eerder onderzoek verder uit te klaren en zo enkele richtlijnen te kunnen opstellen om de hygrische veiligheid/betrouwbaarheid van dit daktype te verbeteren.

5. DAKOPBOUW EN MATERIALEN

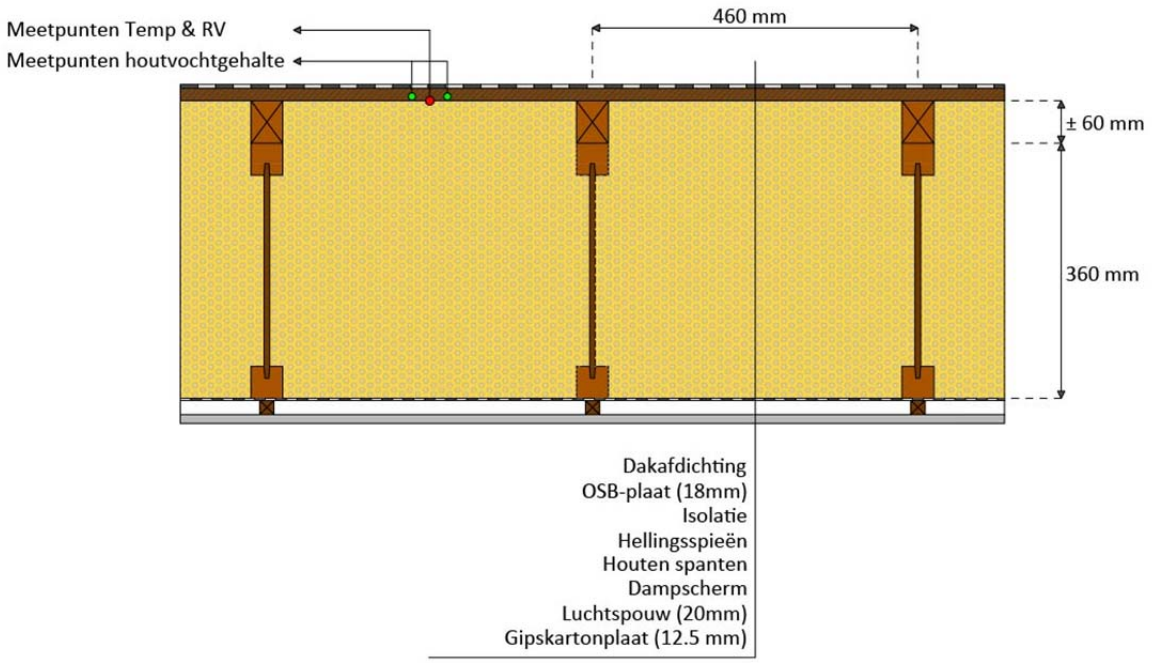
5.1 INLEIDING

De metingen vinden plaats op een compact dak in een passiefhuis, gelegen te Ronse. Boven de badkamer werden acht verschillende dakopbouwen geplaatst, met ingebouwde sensoren. Het is de bedoeling aan de hand van verschillende parameters (vochtgehalte, temperatuur, relatieve vochtigheid en buiten- en binnenklimaat) een inschatting te kunnen maken van het vochtverloop binnen het dak en het risico op aantasting van het hout door schimmelgroei of houtrot. Met deze gemeten waarden kan een vergelijking gemaakt worden tussen de verschillende dakopbouwen en een simulatiemodel opgebouwd worden in WUFI. Met dat model kan de evolutie van het dak verder bekeken worden en andere invloedsfactoren onderzocht worden, zoals andere materialen, beschaduwing van het dak, een ander binnenklimaat en lekkage.

In dit hoofdstuk wordt de dakopbouw en de gebruikte materialen besproken, alsook de metingen die ter plaatse gebeuren. Deze worden dan verder gebruikt in het 7de hoofdstuk voor de opbouw van het WUFI-model.

FIGUUR 38 - BUITENZICHT WONING TE RONSE.

5.2 DAKOPBOUW



FIGUUR 39 - DAKOPBOUW COMPACT, PLAT DAK MET AANDUIDING SENSOREN.

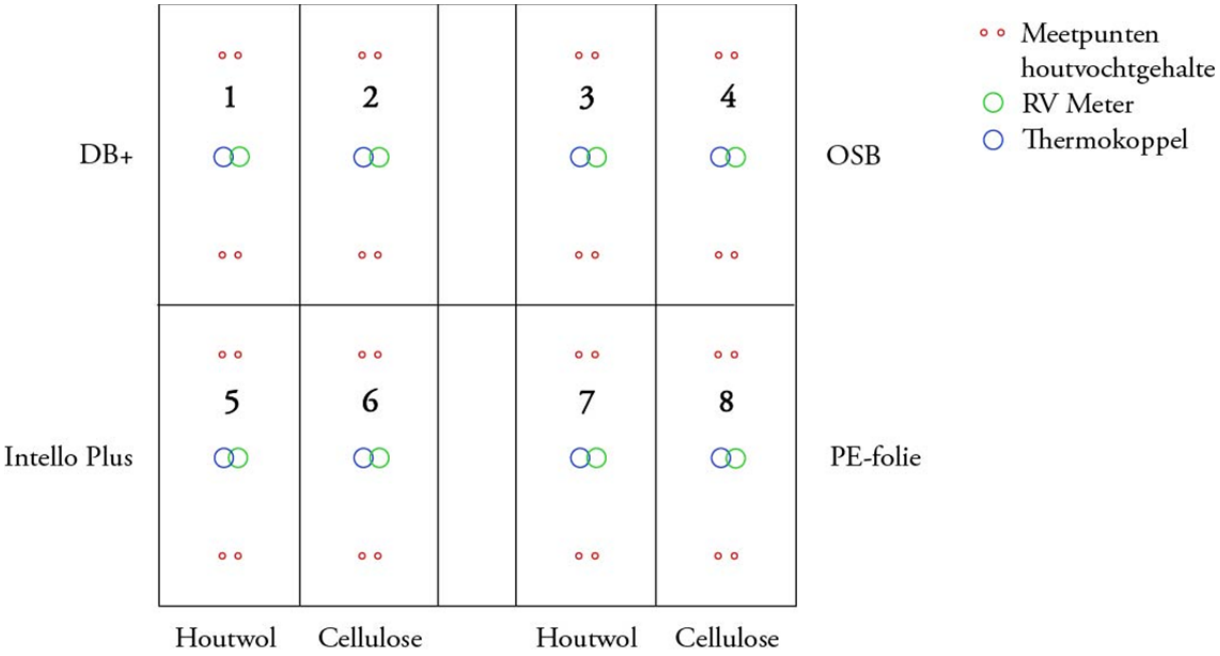
Het compacte dak is opgebouwd (van buiten naar binnen) uit een dakafdichtingsmembraan Resitrix SK-W. Dit is een EPDM-rubber met lasbare overlappen, bestaande uit een toplaag in EPDM-rubber met een intern wapeningnet in glasvezeldraden en aan beide zijden voorzien van een speciale hechtlaag in TPE met SBS en een onderlaag in zelfklevende SBS- gemodificeerde bitumen.

Dit dakafdichtingsmembraan is gelegen op een OSB-plaat van 18 mm dik. Hieronder liggen de hellingsspieën in massief grenen. Deze zijn niet overal even hoog, gemiddeld boven de badkamer 60 mm. Het afvoerpunt is in de hoek van de badkamer, daar is de spie dus het dunste (= 30 mm). Het hoogste punt in de gemeten zone, aan de andere zijde van de badkamer is ongeveer 90 mm hoger dan de spanten. De hoogte van het dak en de isolatiedikte is dus niet gelijk over de geteste zone, maar de invloed hiervan op het vochtgedrag is niet direct zichtbaar in de metingen. Ook bij een simulatie met een hogere dakopbouw bleek de invloed zeer klein te zijn. In de simulatie wordt uitgegaan van een constante hoogte van de hellingsspie, zijnde 60 mm.

De hellingsspieën worden beverstigd op de houten I-liggers van Steico Joist, met een hoogte van 360 mm. Hiertussen wordt de isolatie ingeblazen, ofwel cellulosevezels van Isofloc, ofwel houtwolvezels van Steico Zell. Onderaan de spanten wordt het dampscherm bevestigd. Hier werden 4 mogelijke dampschermen getest: twee vochtgestuurde dampschermen: DB+ en Intello, een OSB-plaat (van 15mm dik) en een PE-folie. Hieronder werd een gipskartonplaat bevestigd voor de afwerking langs de binnenzijde, op enkele houten latten met daartussen een kleine luchtspouw.

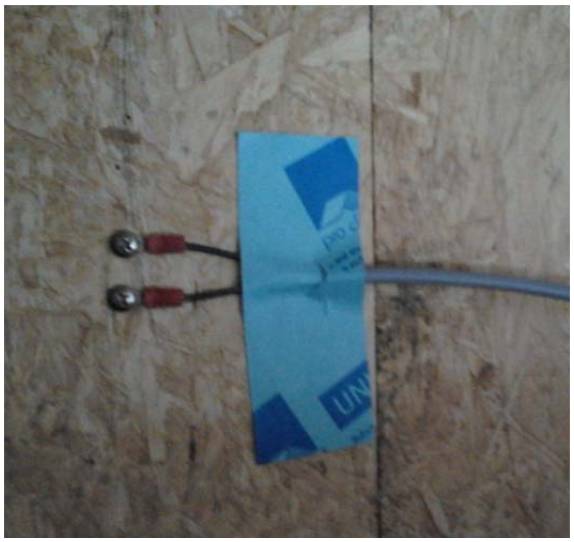
Deze opbouw met verschillende materialen levert dus 8 varianten op:

1.	DB+	Steico Zell	(houtwol)
2.	DB+	Isofloc	(cellulose)
3.	OSB	Steico Zell	
4.	OSB	Isofloc	
5.	Intello	Steico Zell	
6.	Intello	Isofloc	
7.	PE-folie	Steico Zell	
8.	PE-folie	Isofloc	



FIGUUR 40 - COMPARTIMENTERING TESTDAK MET AANDUIDING SENSOREN.

Centraal per dakvariant bevindt zich aan de onderzijde van de OSB-plaat een thermokoppel, voor de meting van de temperatuur, en een sensor voor de relatieve vochtigheid. Voor het meten van het houtvochtgehalte zijn er twee meetpunten, elk bestaande uit twee elektrodes met een tussenafstand van 15 mm. De twee meetpunten liggen 1000 mm uit elkaar. Voor de metingen werd slechts één van beiden gebruikt, ook al omdat bij de opbouwen 5 tot 8 één van de meetpunten een veel lagere waarde gaf dan de andere, die niet in lijn lag met metingen van de overige meetpunten (van opbouwen 1 tot 8).



FIGUUR 41 - PLAATSING VOCHTGEHALTE-SENSOREN.

FIGUUR 42 - PLAATSING SENSOREN TEGEN BINNENZIJDE OSB-PLAAT.

FIGUUR 43 - BEDRADING SENSOREN DOORHEEN DAKOPBOUW.

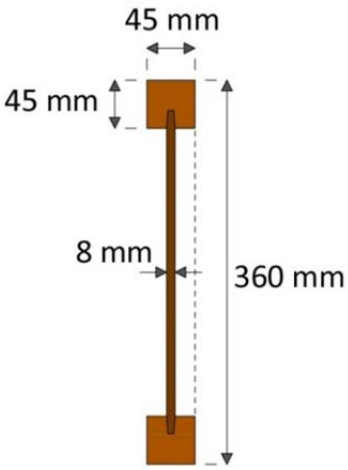
5.3 Materialen

5.3.1 Spanten

Voor de overspanning van het dak worden houten I-liggers gebruikt. Deze zijn lichter in gewicht (4,2 kg/m) en hierdoor worden de koudebruggen verkleind. Als kerplaat wordt een hardboardplaat gebruikt, voorzien van een V-groef over de lengte. De flenzen, uit massief dennenhout, worden met de kernplaat samengevoegd door middel van vochtbestendige bindmiddelen.

In de opening van het spant, tussen de twee flenzen en tegen de lijfplaat, is het mogelijk alvorens het inblazen van de isolatie een houtvezelisolatieplaat te steken. Hierdoor is de vorm van het spant herleid tot een balk en kan de isolatie ingeblazen worden zonder het risico dat de isolatie niet tot in de hoekjes van het spant geraakt. Men spreekt hier over 'voorgeïsoleerde liggers'.

In de technische fiche (zie bijlage B) vinden we enkele hygrothermische eigenschappen, die verder gebruikt kunnen worden in het opstellen van het model:



FIGUUR 44 - AFMETINGEN HOUTEN I-LIGGER.

	Densiteit ρ	Thermische geleiding λ	Soortelijke warmte C	Diffusieweerstandsfactor μ	
Materiaal	[kg/m³]	[W/m.K]	[J/kg.K]	droog	nat
Houten flens	500	0,13	1600	50	20
Hardboardplaat	900	0,14	1700	10	20

5.3.2 Isolatie

Voor de isolatie zijn er twee mogelijkheden, houtvezel- of cellulose-isolatie, beiden ingeblazen in de dakstructuur. Beiden zijn ecologische en duurzame materialen, met gelijkaardige hygrothermische eigenschappen.

Houtvezelisolatie is afkomstig van vers gekapt dunningshout of resthout wat vrijkomt bij de productie van constructiehout. Bij toepassing in droge constructies is de levensduur onbeperkt. Houtvezelisolatie kan zowel gebruikt worden als warmte- en geluidsisolatie. Het heeft daarnaast ook een hoge warmteopslagcapaciteit en een vochtbufferende werking. De isolatie bevat ook enkele toeslagstoffen, zoals aluminiumsulfaat tegen schimmels en amoniumsulfaat ter verhoging van de brandveiligheid.

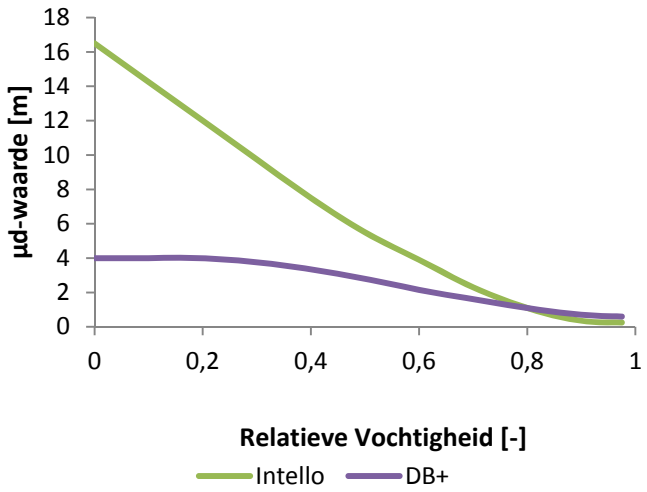
Cellulose haalt men uit gerecycleerde kranten, door deze te vermalen tot wollige vlokken. Deze kunnen net als houtvezelisolatie ingblazen worden in constructies of samengeperst worden tot platen. Boorzouten beschermen het materiaal tegen brand, schimmel en ongedierte [77],[84].

Uit de technische fiches (zie bijlage B), en literatuur, kunnen we al enkele eigenschappen halen:

	Densiteit ρ	Thermische geleiding λ	Soortelijke warmte C	Diffusieweerstandsfactor μ
Materiaal	[kg/m³]	[W/m.K]	[J/kg.K]	
Houtvezel	35 - 42	0,038	2100	1 - 2
Cellulose	30 - 60	0,039	2150	1 -2

5.3.3 Dampschermen

Voor het dampscherm werden 4 mogelijkheden geïnstalleerd: de vochtgestuurde dampremmen DB+ en Intello, een OSB-plaat en een PE-folie. De werking van het dampscherm, en het vochtgestuurde dampscherm in het bijzonder, werden reeds toegelicht in hoofdstuk 3 'Vocht en daken'. In de grafiek wordt het onderscheid weergegeven tussen de DB+ en de Intello. De vochtvariabiliteit van het Intello-dampscherm (0,25 tot 18m) is groter dan van de DB+ (0,6 tot 4m). De gemiddelde μd-waarden zijn respectievelijk 7,5 en 2,3m. De technische fiches bevinden zich in de bijlage [34].



FIGUUR 45 - DAMPDIFFUSIEWEERSTAND VOCHTEGESTUURDE DAMPSCHERMEN.

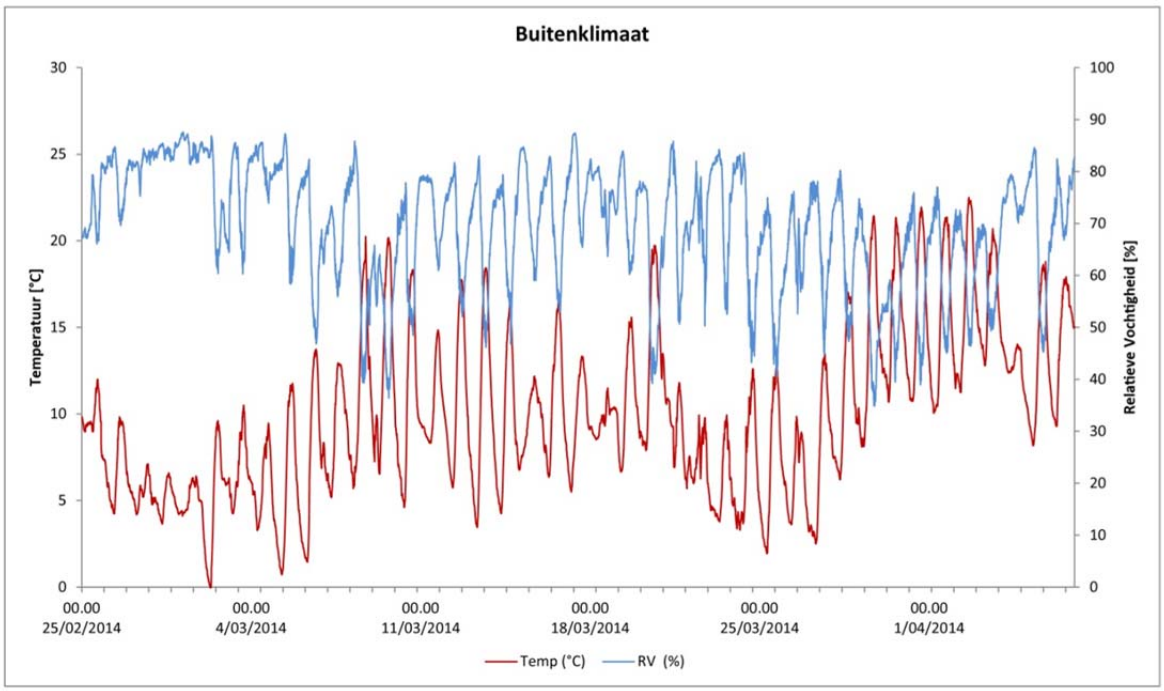
Voor de PE-folie en OSB-plaat beschouwen we de diffusieweerstand als constant. In de literatuur zijn vele waardes terug te vinden voor de verschillende eigenschappen. De diffusieweerstand werd bepaald in het hoofdstuk 'Validatie van materiaaleigenschappen', aan de hand van een proefopstelling.

5.4 METINGEN

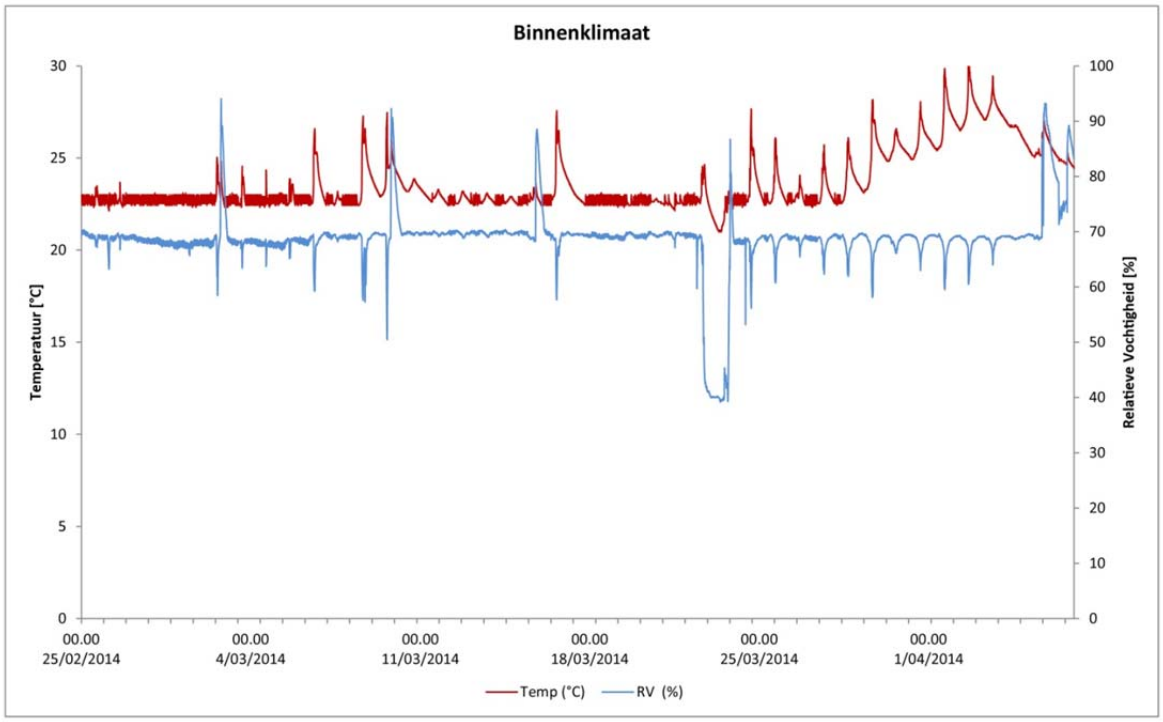
5.4.1 BUITEN- EN BINNENKLIMAAT

Voor het meten van de klimaatsomstandigheden werd een Hobo-logger gebruikt, die de temperatuur en relatieve vochtigheid van de omgeving meet. Vanaf 16 december 2013 werd in de badkamer een gebruik gesimuleerd door het plaatsen van een verwarmingstoestel en luchtbevochtiger, dit omdat de woning nog niet bewoond was en het binnenklimaat dus ook niet representatief was voor gebruik. De relatieve vochtigheid werd ingesteld op 70% en de temperatuur op 23°C. De gemeten waarden schommelen rond deze constante. Er zijn ook enkele pieken te zien in de grafiek. Voor de relatieve vochtigheid komen deze overeen met het uitzonderlijke gebruik van de badkamer, of het leeg zijn van de reservoirs van de bevochtiger. De temperatuur is soms hoger door de zon die binnenschijnt in de ruimte (zeker in april, wanneer het weer beter werd).

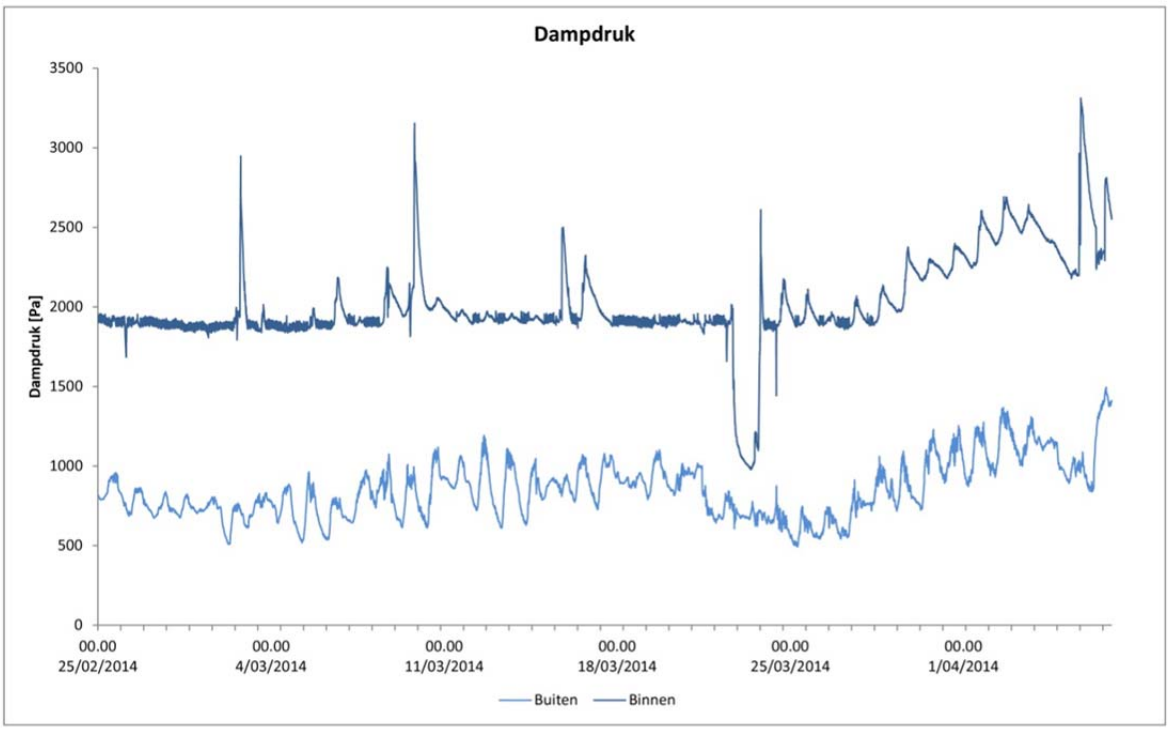
Ook de dampdruk werd uitgezet in een grafiek, waarop het dampdrukverschil tussen binnen en buiten duidelijk zichtbaar is. Naast de temperatuur en de relatieve vochtigheid is ook de straling essentieel voor de werking van het compacte dak en de opstelling van een klimaatfile voor WUFI. Deze gegevens werden aangevraagd bij het KMI, en worden hier weergegeven voor de metingsperiode. De globale straling wordt opgesplitst in een diffuse en directe component.



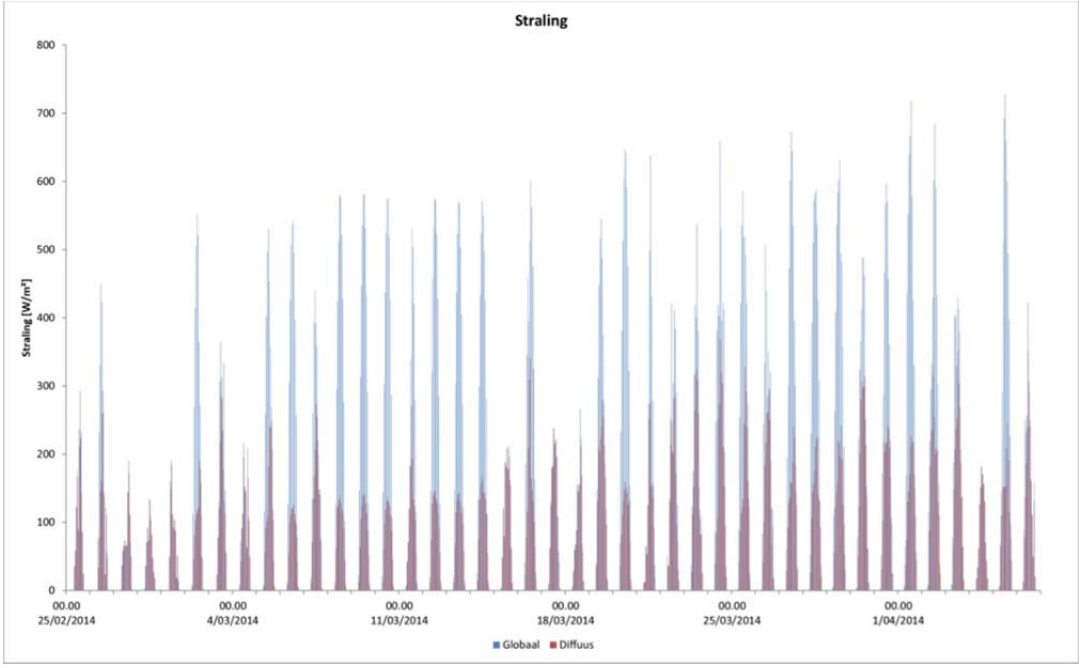
FIGUUR 46 - VERLOOP TEMPERATUUR EN RELATIEVE VOCHTIGHEID BUITENKLIMAAT.



FIGUUR 47 - VERLOOP TEMPERATUUR EN RELATIEVE VOCHTIGHEID BINNENKLIMAAT.



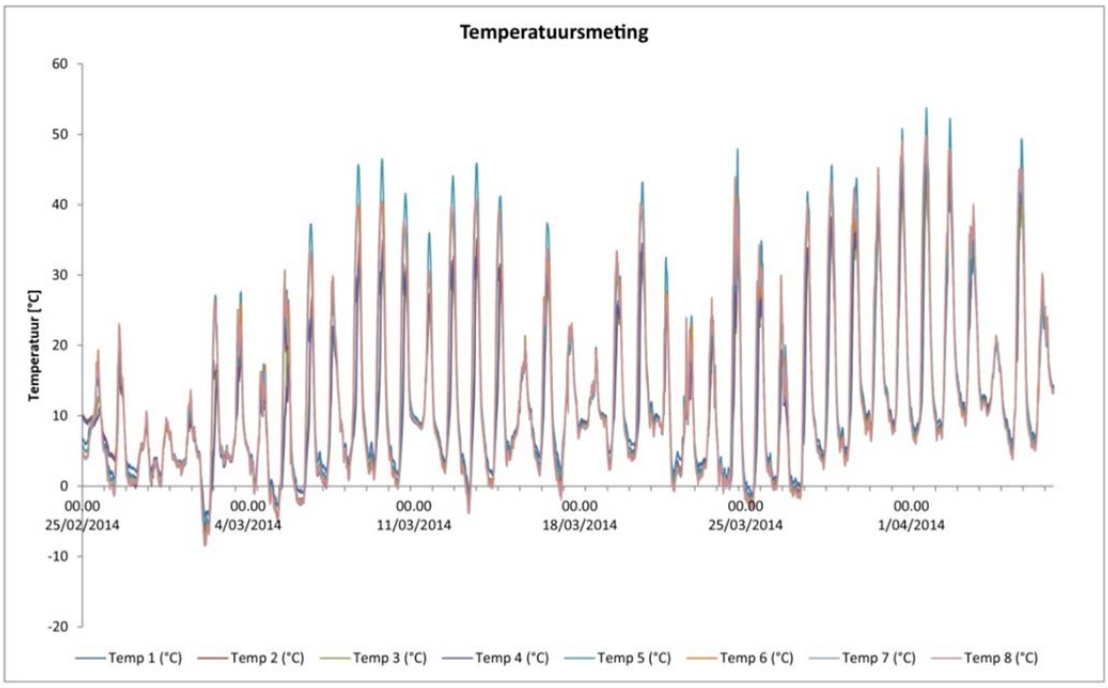
FIGUUR 48 - VERLOOP DAMPDRUK BINNEN- EN BUITENKLIMAAT.



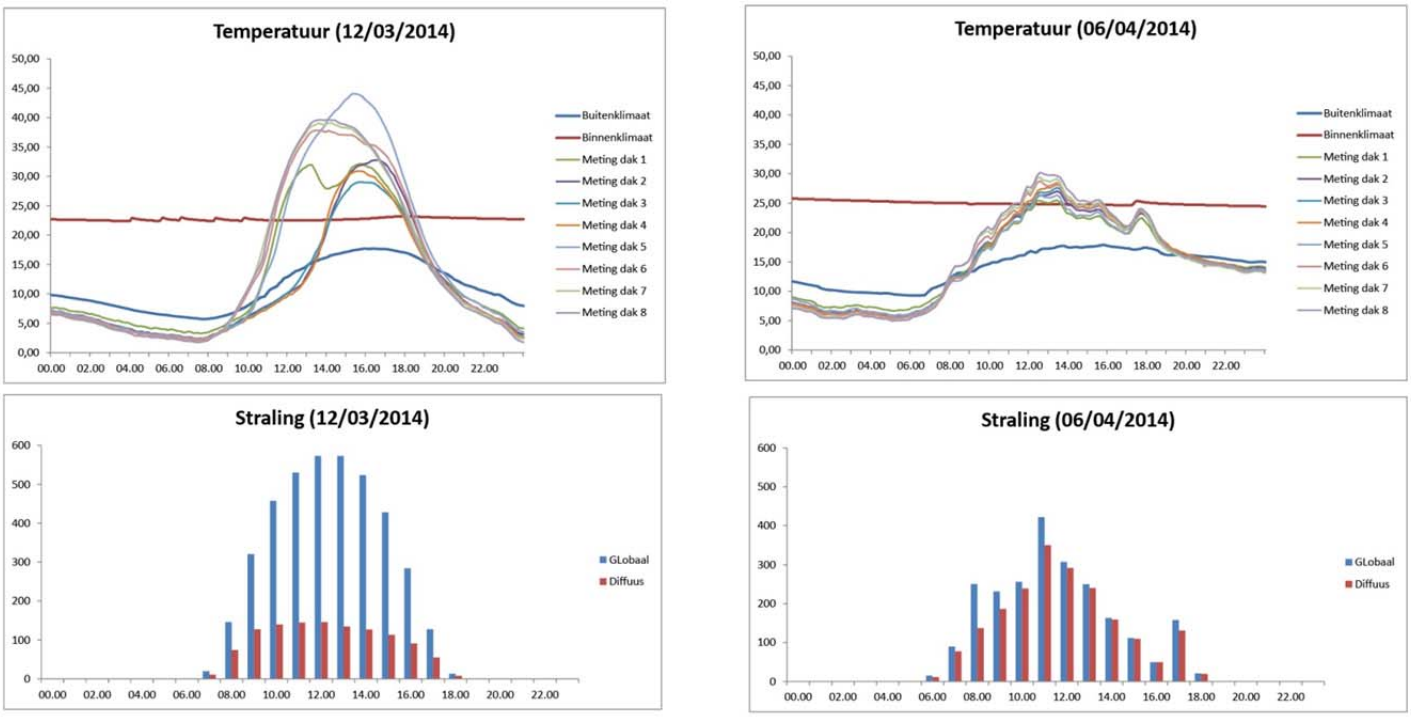
FIGUUR 49 - VERLOOP GLOBALE EN DIFFUSE STRALING.

5.4.2 De Temperatuur

De temperatuur wordt gemeten in het dak net onder de OSB-plaat, met behulp van een DaqPro datalogger. De temperatuur in het dak kan zeer hoog oplopen door de straling op de zwarte dakafdichting. Op het dak waren wel enkele zonnepanelen geplaatst, op de rand met de badkamer. Hierdoor kwamen daksecties 1 tot 4 af en toe in de schaduw te liggen. Om een goede vergelijking te kunnen maken werden deze panelen verplaatst zodat alle secties volledig vrij lagen, en het dak te volle kan uitdrogen. Dit gebeurde op 16 maart 2014 en wanneer we de meting van 12 maart vergelijken met deze van 6 april, is de invloed hiervan duidelijk merkbaar. Ook het belang van de straling wordt hierbij nog eens geduid.



FIGUUR 50 - TEMPERATUURSMETING IN HET DAK.



FIGUUR 51 - TEMPERATUURSMETING EN STRALING GEDURENDE 24 H.

5.4.3 De Relatieve vochtigheid

Bij de relatieve vochtigheid wordt, net zoals bij het houtvochtgehalte, een spanning gemeten en opgeslagen aan de hand van een Grant data logger en Squirrelview. Via een omzettingsformule wordt dan de relatieve vochtigheid bekomen. Deze formule staat in de installatiefiche van de sensoren die in het dak werden ingebouwd:

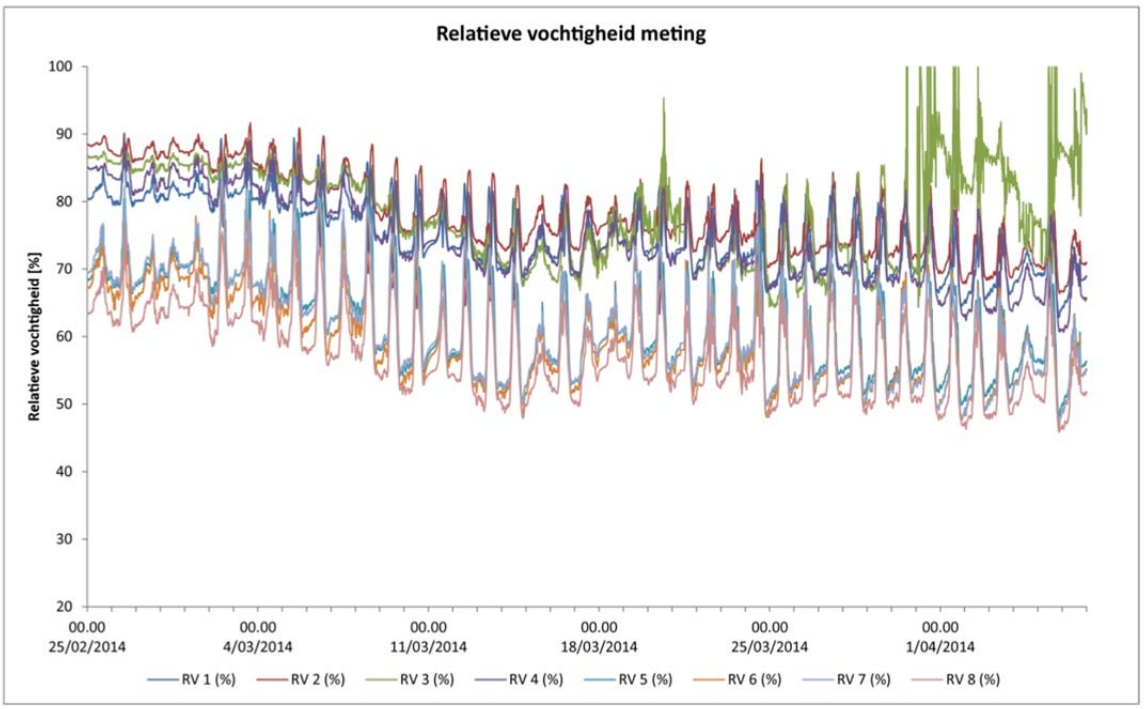
$$V_{OUT} = (V_{SUPPLY}).(0{,}0062.(sensor\ RH) + 0{,}16)$$

$$True\ RH = (sensor\ RH)/(1{,}0546 - 0{,}00216.T)$$

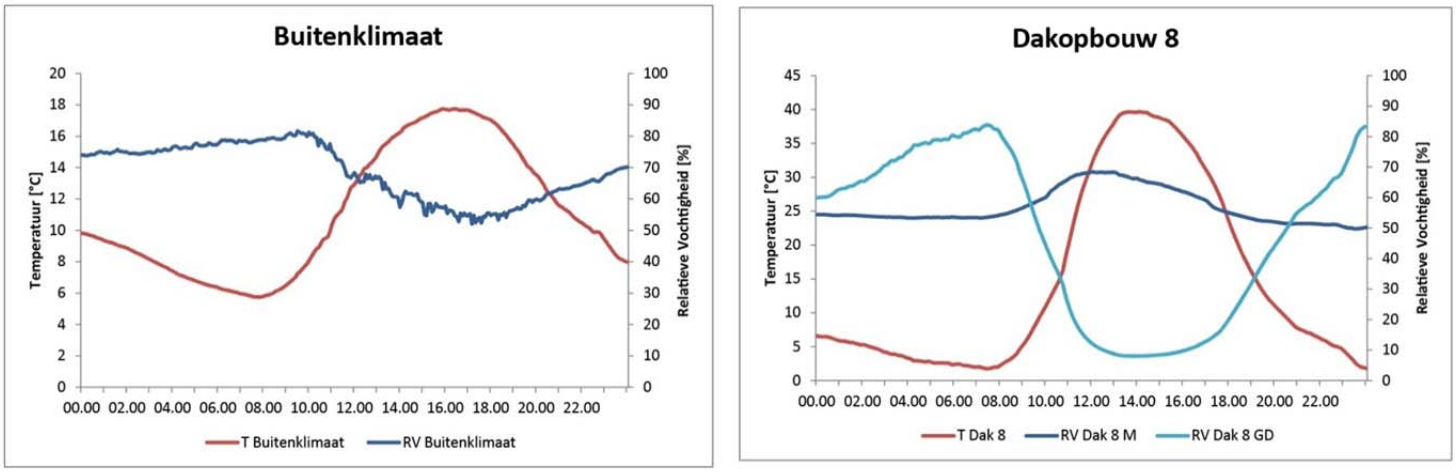
Waarbij V_{SUPPLY} = 5 V. De eerste formule is geldig voor temperaturen rond 25°C, en kan gecorrigeerd worden aan de hand van de tweede formule, voor andere temperaturen.

Bij de meting van de relatieve vochtigheid zien we dat er een groot verschil is tussen de metingen van sectie 1-4 en sectie 5-8. Deze opdeling is bij de andere metingen niet zichtbaar, en er bestaat dus de kans dat het om een fout gaat. Ook bij de vergelijking met de simulaties en een omzetting van het houtvochtgehalte naar de relatieve vochtigheid aan de hand van een vochtopslagcurve, lijken deze waardes niet overeen te stemmen met de bekomen relatieve vochtigheden (zie bijlage C). We gaan er verder van uit dat deze waarden iets opgetrokken moeten worden, en in dezelfde regio liggen als de metingen van sectie 1 tot 4.

Een tweede opmerkelijkheid is het feit dat de gemeten relatieve vochtigheid stijgt overdag, samen met de temperatuur. Dit is niet logisch, aangezien de dampdruk ongeveer dezelfde blijft. Als we de temperatuur en relatieve vochtigheid van het buitenklimaat uitzetten, zien we de omgekeerde beweging. Dit is ook zo bij de simulaties adhv WUFI. Als we in een tweede grafiek de temperatuur en gemeten RV vergelijken met de RV afhankelijk van de temperatuur onder een gelijkblijvende dampdruk, valt hetzelfde op te merken. Dit kan te wijten zijn aan de formule voor de temperatuurscorrectie die niet sterk genoeg is.



FIGUUR 52 - METING RELATIEVE VOCHTIGHEID IN HET DAK.



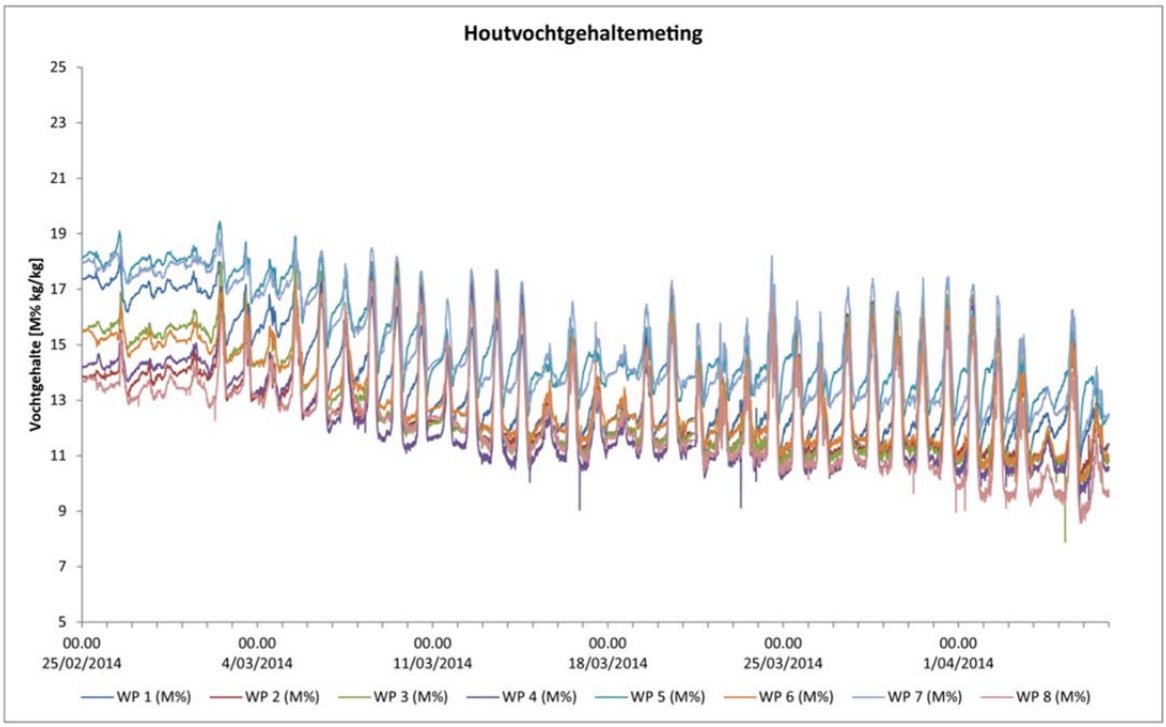
FIGUUR 53 - VERLOOP TEMPERATUUR EN RELATIEVE VOCHTIGHEID 12/03/2014 BUITENKLIMAAT EN SECTIE 8.

5.4.4 HET HOUTVOCHTGEHALTE

De elektronische vochtgehaltemeting gebeurt in de OSB-plaat, waarbij de elektrodes bestaan uit 2 inox-schroeven met tussenafstand 15 mm. De elektrodes worden in serie geschakeld met een gelijkspanningsbron van 12 V en een referentieweerstand van 10 MΩ. De elektrische spanning over de referentieweerstand wordt gemeten en opgeslagen met behulp van een Grant data logger en Squirrelview. Om deze spanning om te zetten naar het vochtgehalte wordt gebruik gemaakt van een omzettingsformule uit eerder onderzoek [35]:

$$u = 0{,}306 - 0{,}0028.\theta + 0{,}040.\log U + 4{,}3.10^{-4}.\theta.\log U - 0{,}11.\log(12 - U) + 0{,}0021.\theta.\log(12 - U)$$

u	[kg/kg]	Vochtgehalte
U	[V]	Spanning over referentieweerstand
θ	[°C]	Temperatuur



FIGUUR 54 - VERLOOP HOUTVOCHTGEHALTEMETING IN DE OSB-PLAAT.

Net als bij de meting van de relatieve vochtigheid stijgt de meting overdag, wanneer de temperaturen hoog oplopen en vooral wanneer er een grote hoeveelheid directe zonnestraling op het dak terechtkomt (zie grafieken in bijlage C). Een plotse sterke stijging van het vochtgehalte met enkele procenten in het hout ligt minder voor de hand, het zou hier ook kunnen gaan om een temperatuurscorrectie die niet voldoende is.

MEETFOUTEN

Na de installatie werd reeds een controlemeting uitgevoerd, zowel op de kabels, schroeven als rechtstreeks in het hout. Hierop zijn al kleine afwijkingen zichtbaar, en er is dus zowieso een meetfout. De meting op de kabels geeft wel hogere waardes dan deze op de schroeven en rechtstreeks in het hout, wat leidt tot een kleine overschatting van het houtvochtgehalte. Dit is dus een veilige aanname. Voor de datalogger werd geplaatst, werden ook enkele handmatige metingen uitgevoerd, om een referentie te hebben bij het begin van de metingen. Deze metingen (net voor de winter) liggen in lijn met de verwachtingen en de latere metingen. Enkel voor sensor 1, 5 en 7 ligt de startwaarde hoger dan de eerdere metingen (tot boven de 17 M%). Ook werden bij sensor 5 tot 8 op één van de twee meetpunten lagere waardes aangetroffen. Deze werden dan ook niet gebruikt bij de verdere metingen, waarbij slechts één meetpunt gebruikt werd per dakcompartiment.

	Controlemeting 8/8/2012			Meting 22/11/2013		Meting 16/12/2013	
Meting op..	kabel	Schroeven	Hout	1	2	1	2
1.	12,3	10,5	9,2	12,9	13,4	14,4	13,6
2.	11,6	10,4		13,0	13,4	14,4	13,8
3.	12,5	11,6		14,3	14,5	14,6	14,7
4.	12,8	11,7		13,0	12,1	14,1	13,7
5.	12,0	10,5		13,7	8,8	14,0	10,1
6.	12,5	10,9		13,5	8,3	14,4	9,8
7.	12,1	11,1		14,7	9,1	15,5	11,2
8.	12,5	10,9		13,7	8,5	13,7	10,3

Ook in eerdere onderzoeken werd de afwijking van de metingen onderzocht. Fazio ea [21] beschouwen de metingen met lagere vochtgehaltes nauwkeuriger dan deze bij hogere vochtgehaltes. Dit omdat hout met een lager vochtgehalte een hoge elektrische weerstand heeft. Boven het saturatiepunt van de houtvezels is de meting van weinig waarde.

Vochtgehalte van 6 tot 12 %	Nauwkeurigheid binnen 0,5 %
Vochtgehalte van 12 tot 20 %	Nauwkeurigheid binnen 1 %
Vochtgehalte van 20 tot verzadiging	Nauwkeurigheid binnen 2 %

Geving en Holme komen tot een gelijkaardige conclusie, waarbij de nauwkeurigheid verminderd bij een stijgend vochtgehalte. Zij baseren zich op eerder onderzoek op dennenhout door Du ea [25],[19].

Houtvochtgehalte [M%]	7	12	18	25
95% Betrouwbaarheidsinterval	± 0,37	± 0,65	± 1,21	± 2,09

6. VALIDATIE VAN MATERIAALEIGENSCHAPPEN

6.1 INLEIDING

Een eerste stap in de opbouw van een representatief model voor de verdere simulaties, is het bepalen van de juiste materiaaleigenschappen. In de literatuur zijn vele waardes voorhanden, net als in de materialendatabase van WUFI [51]. Voor sommige materialen zijn deze eenduidig en zijn overal ongeveer dezelfde waarden terug te vinden, voor andere lopen deze waarden sterk uit elkaar en zijn deze materiaaleigenschappen afhankelijk van de samenstelling, densiteit, of andere invloedsfactoren.

Vele materiaaleigenschappen zijn dus beschikbaar, en het is dan ook niet de bedoeling om deze hier opnieuw allemaal te bepalen. Het is eerder de bedoeling enkele waarden te controleren, om een keuze te kunnen maken uit de mogelijke materiaalvarianten in de database van WUFI.

Het onderzoek wordt opgedeeld in 3 proeven: Het opstellen/controleren van de sorptiecurve, de dampdiffusieproef en de capillariteitsproef. 3 materialen worden getest: Houtwol-isolatie (Steico Zell), Cellulose-isolatie (Isofloc) en een OSB-plaat. Dit zijn stalen van de materialen die ook werden gebruikt in het compacte platte dak te Ronse. Eerst wordt een korte algemene bespreking gegeven van de proef, daarna de speciefieke opstelling voor de verschillende materialen en ten slotte de bekomen resultaten.

6.2 OPSTELLEN SORPTIECURVE

6.2.1 ALGEMEEN

De sorptiecurve geeft de relatie tussen het vochtgehalte van een materiaal in evenwicht met zijn omgeving en de relatieve vochtigheid van de omringende lucht, op een bepaalde temperatuur [11]. De curve kan opgedeeld worden een adsorptie-curve (proef uitgevoerd met stijgende relatieve vochtigheid) en een desorptiecurve (dalende relatieve vochtigheid). In het simulatieprogramma WUFI wordt een abstractie gemaakt van de opdeling. In deze proef bepalen we de adsorptie-curve.

Vooraleerst wordt het testspecimen gedroogd tot een constante massa. Gedurende een constante temperatuur, wordt het specimen vervolgens in verschillende omgevingen geplaatst, met een stijgende relatieve vochtigheid. Het vochtgehalte wordt bepaald wanneer het testspecimen in evenwicht is met zijn omgeving. Dit evenwicht wordt bepaald door het specimen te wegen tot een constante massa bereikt wordt.

Referentie-sorptiecurves worden bepaald op een temperatuur van 23 ± 0,5 °C. In dit geval kiezen we ook voor 23°C om een vergelijking te kunnen maken met resultaten uit andere onderzoeken en andere gelijkaardige materialen. Het vochtgehalte, u, van ieder specimen wordt bepaald volgens:

$$u = \frac{m - m_0}{m_0}$$

u	[% kg/kg]	Vochtgehalte
m	[kg]	Massa van het testspecimen
m_0	[kg]	Massa van het droge testspecimen

De fout in het bepalen van het vochtgehalte kan volgens EN ISO 12571 [11] ingeschat worden aan de hand van:

$$\frac{\Delta u}{u} = \pm 0{,}0002 \; \frac{m_0}{m - m_0}$$

Bij de meting kan het vochtgehalte volgens EN ISO 12570 [10] bepaald worden met een 3% nauwkeurigheid massa per massa-eenheid. Verder kan ook de droge densiteit van het materiaal bepaald worden en het vochtgehalte massa per volume-eenheid.

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V}$$

$$w = u \,.\, \rho_0$$

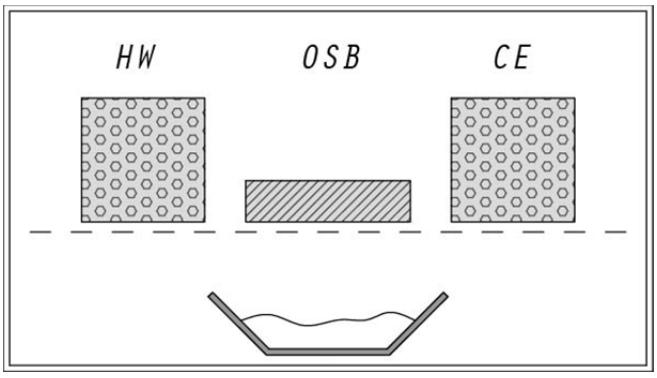
ρ_0	[kg/m³]	Droge densiteit
V	[m³]	Volume van het testspecimen
w	[kg/m³]	Vochtgehalte

6.2.2 Opstelling

De materialen werden gedurende 2 dagen gedroogd in een oven op 105 °C [10]. Hierna konden de testspecimen gemaakt worden. Voor de OSB-plaat was dit vrij eenvoudig en werden stukjes gezaagd van 75 op 75 mm (met een dikte van 15 mm). De losse isolatiematerialen werden in een 'drager' geplaatst. Deze bestaat uit een metalen kubusstructuur om de vorm te bewaren en een polyester-net met fijne openingen om het materiaal bijeen te houden, maar het vochttransport doorheen het proefstuk niet te beïnvloeden. Deze structuur, alsook voor de dampdiffusieproef en capillariteitsproef, werd gebaseerd op het eerdere onderzoekswerk van Hansen, Rode ea. [28].

FIGUUR 55 - OPSTELLING SORPTIEPROEF: HOUTWOL, CELLULOSE EN OSB-PLAAT.

Deze isolatimaterialen worden in het dak ingeblazen met een bepaalde densiteit. Voor de houtwol lag deze in de woning in Ronse rond de 35 kg/m³, voor de cellulose was deze iets hoger, 45 kg/m³. Deze waarden zijn een inschatting en ook niet overal in het dak gelijk. Om een goede vergelijking te kunnen maken tussen beide materialen werd er voor gekozen de materialen te testen met een densiteit van 40 kg/m³. De grootte van de kubusjes is 50 x 50 x 50 mm, en dus werd 5g isolatiemateriaal in iedere 'drager' geplaatst. Per materiaal werden 3 testspecimen gemaakt.



FIGUUR 56 - OPSTELLING SORPTIEPROEF.

Vervolgens werden deze testspecimen in een afgesloten 'klimaatkamer' (plastic box) gestoken, met een bepaalde relatieve vochtigheid. Deze box werd dan in een oven geplaatst, met de temperatuur ingesteld op 23,0 °C. Het evenwichtsvochtgehalte wordt op 3 meetpunten van de relatieve vochtigheid bepaald. Deze relatieve vochtigheid wordt bereikt aan de hand van een verzadigde zoutoplossing [11]:

- 75% RV NaCl 75,36 ± 0,13
- 85% RV KCl 84,65 ± 0,27
- 95% RV KNO_3 94,00 ± 0,60

Deze zoutoplossingen werden in een kommetje gedaan in de box, met daarboven een rooster waarop de testmaterialen lagen. De isolatiematerialen reageren zeer snel met hun omgeving, daardoor is het essentieel dat deze snel gewogen werden na het verlaten van hun testcondities.

6.2.3 Resultaten

De dichtheid van de geteste OSB-plaat ligt rond de 560 kg/m³. Aan de hand van de resultaten kan een gepaste sorptie-curve gekozen worden uit de WUFI-database. Voor de isolatiematerialen wordt deze opgesteld met behulp van resultaten uit de literatuur en eigen onderzoek. De gedetailleerde metingen bevinden zich in bijlage A.

	OSB-plaat		**Cellulose**		**Houtwol**	
RV	u [%]	[kg/m³]	u [%]	[kg/m³]	u [%]	[kg/m³]
75 %	12,64	71,56	11,17	4,51	13,63	5,47
85 %	16,90	95,70	14,80	5,97	22,54	9,04
94 %	19,42	110,01	18,97	7,65	32,98	13,23

Van de isolatiematerialen zal de houtwol meer vocht opnemen bij eenzelfde relatieve vochtigheid. Dit zou een groot effect kunnen hebben op het vochtgedrag binnen het dak, maar door de verschillende densiteit waarmee deze isolatiematerialen worden ingeblazen, komen deze punten/curves dichter bij elkaar te liggen (zie case 4.1 bij simulaties).

De fout Δu bepaald volgens EN ISO 12571 [11] is slechts ±0,02%. De eigenlijke fout zal echter groter zijn en eerder rond de 3% liggen [10].

6.3 De dampdiffusieproef

6.3.1 Algemeen

Een tweede belangrijke eigenschap van bouwmaterialen, in verband met vochttransport, is de dampdiffusieweerstand. De bepaling hiervan wordt beschreven in *"EN ISO 12572: Warmte- en vochteigenschappen van bouwmaterialen en –producten: Bepaling van de waterdampdoorlatendheidseigenschappen"* [12]. In het 1ste hoofdstuk 'Warmte- en vochtransport in contructies' wordt het principe hiervan kort besproken.

Omdat het monster en het potje kunnen overlappen, en er zo een 'gemaskeerde rand' ontstaat, werd een correctiefactor hiervoor opgesteld. De totale stroom doorheen het monster is groter dan deze door het blootgestelde gebied, wat leidt tot een overschatting van de dampdoorlatendheid. Dit 'masked edge effect' zou leiden tot betere resultaten dan in de werkelijkheid [12]:

$$x = \frac{g_{me}}{g} = 1 + \frac{4.d}{\pi.S} \ .ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2.\pi.b/d}\right)$$

g_{me}	[kg/m².s]	Dampstroomdichtheid met 'masked edge'
g	[kg/m².s]	Dampstroomdichtheid zonder 'masked edge' mee te rekenen
d	[m]	Dikte van het proefstuk
b	[m]	Breedte van de gemaskeerde rand
S	[m]	4 x de testoppervlakte / omtrek

Ook voor de invloed van luchtlagen te begroten, bestaat een correctiefactor. De luchtlaag tussen het droogmiddel/zoutoplossing en het testmonster heeft ook een zekere weerstand op de dampstroom. Voor de meeste materialen is deze veel lager dan de materiaalweerstand, maar voor zeer doorlaatbare materialen kan dit toch leiden tot een grote foutmarge. Annex G van EN ISO 12572 [12] geeft aan deze te bereken wanneer de equivalente diffusiedikte kleiner is dan 0,2 m. De damppermeabiliteit wordt hierbij in de berekeningen gecorrigeerd:

$$W_c = \frac{1}{\frac{A.\Delta p_v}{G} - \frac{d_a}{\delta_a}}$$

W_c	[kg/(m².s.Pa)]	Gecorrigeerde waterdamppermeabiliteit
A	[m²]	Oppervlakte testspecimen
G	[kg/s]	Waterdampstroom
d_a	[m]	Dikte van de luchtlaag

De dampweerstand van de luchtlaag boven een testspecimen is verwaarloosbaar. Bij zeer dampdoorlatende materialen en dunne membranen kan deze volledig worden weggewerkt door een luchtsnelheid van 2 m/s boven de testopstelling te realiseren.

Ook voor deze proefopstelling is er een zekere fout op de resultaten, zeker bij het vergelijken van de resultaten met verschillende relatieve vochtigheid. De foutmarge wordt bepaald aan de hand van een formule opgesteld door Hens & Janssens [38]:

$$\varepsilon(Z) = \left[1 + \frac{\Sigma Z_a}{Z}\right].[\varepsilon(A) + \varepsilon(\Delta\varphi) + \varepsilon(p_{sat}) + \varepsilon(G)] + \frac{\Sigma Z_a}{Z}.\varepsilon(\Sigma Z_a)$$

$\varepsilon(x)$	[%]	Relatieve fout op de waarde van x
Z	[m².s.Pa/kg]	Dampdiffusieweerstand
ΣZ_a	[m².s.Pa/kg]	Som vd diffusieweerstanden van de luchtlagen rondom het testspecimen

Aparte foutmarges per onderdeel werden niet bepaald. Er werd uitgegaan van enkele aannames [79]: $\varepsilon(A) = 1\%,\ \varepsilon(p_{sat}) = 1{,}5\%,\ \varepsilon(\Delta\varphi).\Delta\varphi = 2\%$ en $\varepsilon(G) = 4\%$.

6.3.2 Opstelling

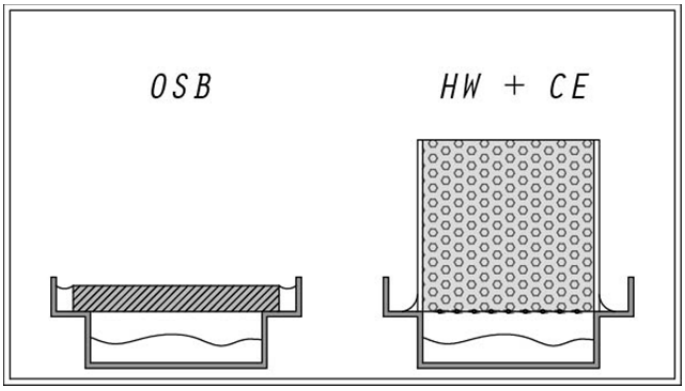
Bij deze proef wordt de dampweerstand bepaald voor de 2 isolatiematerialen, houtwol en cellulose, en 2 van de 4 dampschermen, de OSB-plaat en PE-folie. De andere 2 dampschermen die gebruikt worden in de testopstelling zijn de vochtgestuurde dampremmen DB+ en Intello. De dampdiffusieweerstand van deze dampschermen is volledig bepaald en weinig verschillend per specimen, in vergelijking met bijvoorbeeld de OSB-plaat. Eigen onderzoek is hierbij niet echt een meerwaarde.

Omdat we hier vooral de eigenschappen willen onderzoeken die de materialen vertonen in gebieden van hoge relatieve vochtigheid, wordt hier enkel gebruik gemaakt van de 'wet cup'-test. In de cups worden dezelfde zoutoplossingen gebruikt als bij de bepaling van de sorptie-isotherm. Voor de omgeving wordt gebruik gemaakt van NaBr (58,20 ± 0,42 %RV).

		Relatieve Vochtigheid [%]	
Set	Temperatuur [°C]	Omgeving	Cup
A	23,0	58	75
B	23,0	58	85
C	23,0	58	94

De cups zijn gemaakt van inox en bestand tegen de gebruikte zouten. De opening van de cup is 100 x 100 mm. Hierin wordt de verzadigde zoutoplossing gedaan, met een minimumdiepte van 15 mm. De luchtruimte tussen de zoutoplossing en het testspecimen is (15 ± 5) mm [12].

De te gebruiken materialen dienen alvorens de proef bewaard te worden in bepaalde condities: (23 ± 5) °C en (50 ± 5) % RV. Voor isolatiematerialen is dit slechts enkele uren, voor andere hygroscopische materialen tot enkele weken. Voor membranen is deze bewaringsvoorwaarde niet van toepassing.



FIGUUR 57 - OPSTELLING DAMPDIFFUSIEPROEF.

Net als bij de bepaling van de sorptie-curve dienen de losse isolatiematerialen in een bijkomende 'drager' geplaatst worden. Hiervoor wordt een structuur gemaakt uit plexiglas. Dit materiaal is volledig dampdicht, en om ook de hoekverbindingen volledig dampdicht te maken werden deze met silicone-lijm in een aluminium hoekprofiel geplakt. Dit zorgt ook voor de stijfheid van de vorm. De opening van deze kubus is 100 x 100 mm, net als de cup, zodat deze hier perfect op past. Om het materiaal onderaan tegen te houden, wordt een metalen rooster voorzien met daarop een polyesternet met fijne openingen. De hoogte van de structuur is 100 mm. Na het plaatsten op de cup, wordt deze 'houder' dampdicht vastgekit op de cup. Net als bij de andere proeven wordt het isolatiemateriaal getest met een dichtheid van 40 kg/m³.

De OSB-plaat wordt direct in de cup geplaatst en vastgekit met silicone. Hierbij is er een kleine overlapping tussen de cup en het proefstuk (aanpassing aan de hand van de correctiefactor). De PE-folie wordt over een glazen bokaal gespannen, na het aanbrengen van silicone op de randen voor een dampdichte aansluiting.

FIGUUR 58 - OPSTELLING DAMPDIFFUSIEPROEF: HOUTWOL.

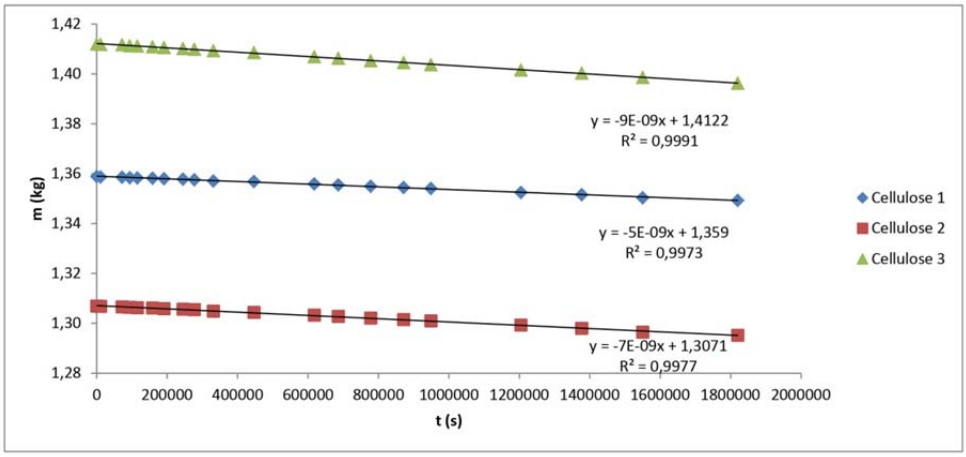
FIGUUR 59 - OPSTELLING DAMPDIFFUSIEPROEF: OSB-PLAAT.

Voor het dampdicht afkitten van de proefstukken wordt silicone gebruikt. De resultaten hiervoor zijn vrij goed volgens verschillende eerdere onderzoeken, net als een butyl-mystiek of een aluminium-tape. Producten zoals bijenwas zijn minder aan te raden [69],[80]. Slanina geeft wel aan dat silicone onvoldoende kan zijn voor hoge dampdiffusieweerstanden [76].

Bij het testen van materialen bij hogere relatieve vochtigheden, worden de poriën van het materiaal gevuld met water. Dit verhoogd het transport van vloeibaar water, maar verlaagd het mogelijke damptransport [12].

6.3.3 Resultaten

De resulaten van de isolatiematerialen liggen iets hoger dan de aangegeven waardes in de technische fiche (μ = 1-2), maar zijn voor beide materialen gelijkaardig. Het damptransport doorheen de isolatie zal dus soortgelijk verlopen. Opmerkelijk is wel dat het damptransport stijgt naargelang de relatieve vochtigheid rondom het specimen stijgt. Dit zou eerder omgekeerd moeten zijn.



FIGUUR 60 - MASSA-TIJDSCURVE DAMPDIFFUSIEPROEF: CELLULOSE.

	Cellulose		**Houtwol**		**OSB-plaat**		**PE-folie**	
Gem. RV	μ [-]	Sd [m]	μ [-]	Sd [m]	μ [-]	Sd [m]	μ [-]	Sd [m]
66,5 %	2,16	0,22	2,64	0,26	122,64	1,84	25912,5	3,89
71,5 %	2,42	0,24	2,78	0,28	233,70	3,51	82310,4	12,35
76 %	2,56	0,26	2,85	0,28	228,75	3,43	112795,70	16,92

Ook de waardes van de OSB-plaat liggen vrij ver uit elkaar. De foutmarge voor alle testspecimen is 9 – 10%, volgens [38]. Een inschatting van de materiaaleigenschappen maken, is wel mogelijk. De dampdiffusieweerstand van een OSB-plaat wordt in WUFI ingesteld op 150, deze waarde zullen we dan ook verder gebruiken. Een cuptest in IEA Annex 41 [69] bepaald deze waarde op 160.

Het damptransport doorheen de PE-folie is zeer klein, een kleine afwijking in de metingen of onnauwkeurigheid kan al snel grote gevolgen hebben op het resultaat. We nemen voor de PE-folie een waarde van μd = 10m aan. Alle metingen en grafieken bevinden zich in bijlage A.

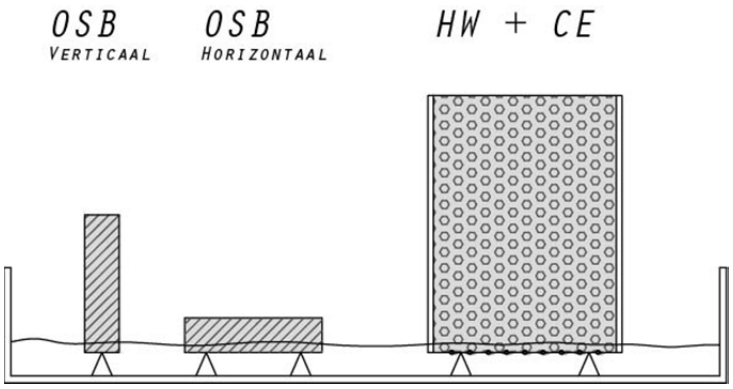
6.4 De capillariteitsproef

6.4.1 Algemeen

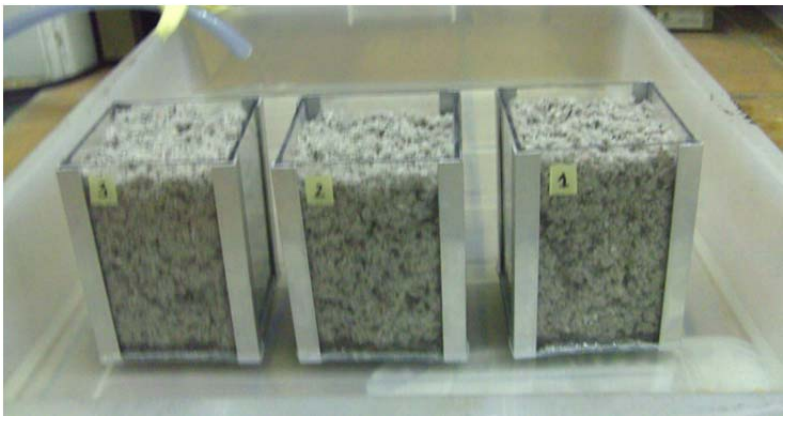
Als laatste wordt de waterabsorptie bepaald door gedeeltelijke onderdompeling [8]. Deze eigenschap beschrijft de capillaire zuiging van een materiaal, opgedeeld in het capillair vochtgehalte w_c en de absorptiecoëfficiënt A. De methode bestaat erin enkele proefmonsters in water te plaatsen en de evolutie van de massa van het proefstuk te volgen in functie van de tijd.

6.4.2 Opstelling

De monsters van de OSB-plaat worden zowel horizontaal als verticaal in het water geplaatst, om te kijken of er een onderscheid te maken is tussen beide richting (vezelrichting of loodrecht hierop). Voor de losse isolatiematerialen (houtwol en cellulose) wordt opnieuw een bijkomende structuur gemaakt. De opbouw is dezelfde als bij de dampdiffusieproef, met plexiglas-wanden (het oplopende vochtfront is hierbij zichtbaar) en een rooster onderaan, bestaande uit een metalen rooster voor de structuur en een fijn polyester-net om het materiaal tegen te houden. De afmetingen van het contactoppervlak met het water zijn 100 x 100 mm, en de hoogte 150 mm. Net als bij de andere proeven is de dichtheid van het isolatiemateriaal 40 kg/m³. De OSB-proefstukken zijn 75 x 75 mm, met een dikte van 15 mm. Er zijn 3 specimen per materiaal. De proefstukken worden ± 5 mm onder het wateroppervlak geplaatst [65].



FIGUUR 61 - OPSTELLING CAPILLARITEITSPROEF.



FIGUUR 62 - OPSTELLING CAPILLARITEITSPROEF: CELLULOSE.

FIGUUR 63 - OPSTELLING CAPILLARITEITSPROEF: OSB VERT.

De testcondities zijn minder strikt voor deze proef, en worden niet gecontroleerd [8]. De testmaterialen dienen voor de proef gestockeerd te worden onder testomstandigheden tot evenwicht optreedt.

Testcondities	Temperatuur [°C]	Relatieve vochtigheid [%]
Toegestane bereik	18 tot 28	40 tot 60
Variatie tijdens test	± 2	± 5

Bij het wegen van de stalen worden deze uit het water gehaald en ongeveer 10 seconden op een handdoek geplaatst, zodat overtollig water opgenomen wordt. Bij de isolatiematerialen wordt na de weging de bovenzijde van de structuur afgedekt zodat het door het materiaal opgezogen water niet terug verdampt.

6.4.3 Resultaten

Het verschil tussen beide isolatiematerialen is bij deze proef veel groter. De cellulosevlokken zuigen het water goed op, terwijl de houtwol enkel in de onderste laag (1 cm) nat wordt, en dit door de onderdompeling in het water. Verder zal dit materiaal in heel beperkte mate water opzuigen. De hier berekende waarde is dan ook zeer twijfelachtig, en enkel geldig bij rechtstreekse onderdompeling in water. Wanneer het testspecimen uit het water gehaald wordt, zal op enkele seconden tijd bijna alle 'opgezogen' water uit het materiaal stromen. Het is dan ook beter deze waarde op 0 in te stellen. In de simulaties is dit effect weinig merkbaar, daar de isolatie niet in contact komt met vloeibaar water. Het resultaat voor cellulose is wel realistisch in vergelijking met eerdere resultaten door Hansen [28], A= 0,56 [kg/m².√s] en Q_{cap}=39 kg/m².

		Cellulose	Houtwol	OSB hor.	OSB vert.
A	[kg/m².√s]	0,48	0,02	0,0045	0,011
Q_{cap}	[kg/m²]	36	6,2	9,2	25
W_c	[kg/m³]	233	22	611,6	611,6
D_w	[m²/s]	3,33E-06	6,49E-07	4,25E-11	2,54E-10

De OSB-plaat zal langs de vezels (verticaal) het water 2x zo snel opzuigen dan loodrect op de vezelrichting (horizontaal). Het capillaire vochtgehalte werd voor beide posities gelijkgesteld op de waarde van de horizontale opzuiging, doordat het vochtfront de bovenzijde van het rechtopstaande specimen niet bereikte. Een mogelijke oorzaak is de verdamping van het vocht, nadat dit werd opgezogen. In IEA Annex 41 [69] vinden we als resultaat: A= 0,011 kg/m².√s en W_c= 840 kg/m³. Bij het opzuigen zet het materiaal ook verder uit, zodat de dikte van het specimen zelfs met enkele millimeters toeneemt.

Na het uitvoeren van de proef en het uitdrogen van het materiaal, valt wel op dat de cellulose-isolatie niet naar zijn oorspronkelijke structuur terugkeert, maar eerder een vaste koek vormt. Of dit ook verdere gevolgen heeft voor de thermische (en hygrische) eigenschappen is niet geweten, maar misschien interessant verder te onderzoeken. Zo zou een mogelijk lek in de dakconstructie grote gevolgen kunnen hebben op de werking van de isolatie.

FIGUUR 64 - CELLULOSE NA OPDROGING.

7. SIMULATIES ADHV WUFI 2D

7.1 VERGELIJKING METINGEN EN SIMULATIES

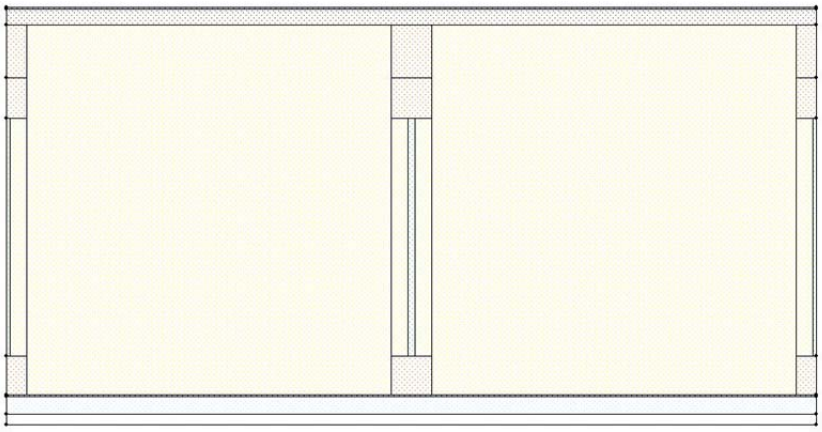
7.1.1 OPBOUW SIMULATIEMODEL

Een eerste stap in het onderzoek naar de invloed van verschillende parameters op het vochtgedrag van compacte platte daken, is het opstellen van een standaardmodel dat het werkelijke gedrag benadert en overeenkomt met de metingen in het testdak. Dit standaardmodel kan dan later vergeleken worden met andere onderzoeksmodellen.

GEOMETRIE

De opbouw van het dak is gekend en kan op een licht vereenvoudigde wijze overgenomen worden in WUFI. De meeste materialen bestaan uit één laag, enkel de spanten worden opgedeeld in de flenzen en de lijfplaat. De zone tussen de spanten en hellingsspieën wordt gevuld met isolatie. Onder het dampscherm wordt een luchtspouw van 20 mm gemaakt, zonder houten bevestigingslatten voor de gipskartonplaat. De invloed hiervan is dan ook zeer klein. In het model wordt één volledig spant opgenomen en twee halve spanten, die zich op een symetrie-as bevinden. Zo is het vochtverloop duidelijk te zien op de verschillende beelden.

Belangrijk in de opbouw van het WUFI-model is dat de dikte van membranen en folies altijd 1 mm moet zijn. Alle materiaaleigenschappen in de database zijn hierop ingesteld, en bij het invoeren van een niew materiaal moeten de materiaalparameters dan ook omgezet worden naar deze dikte.



FIGUUR 65 - OPBOUW VAN HET COMPACTE PLATTE DAK IN WUFI.

GRID

Het grid wordt ingesteld op *fine*, met 150 elementen in de x-richting en 148 elementen in de y-richting.

MATERIALEN

Voor de materialen worden enkele materialen uit de database gekozen, andere worden zelf aangemaakt op basis van bestaande materiaalmodellen. Zo worden de dakafdichting, PE-folie, gipsplaat en luchtspouw uit de database van WUFI overgenomen.

Materiaal	Den.[kg/m³]	Poro.[m³/m³]	H.Cap.[J/kgK]	Ther.Cond.[W/mK]	Diff.Res.Fac[-]
Gypsum board	850	0,65	850	0,2	8,3
Air Layer 20 mm	1,3	0,999	1000	0,13	0,56
Roof membrane	2400	0,001	1000	0,5	100000
PE-membrane	130	0,001	2300	2,3	50000

De anderen worden op basis van materialen uit de database, materiaaleigenschappen uit de literatuur of technische fiches van de producenten en eigen onderzoek samengesteld. Hierbij zijn nog steeds enkele materiaaleigenschappen niet met zekerheid vast te leggen, maar eerder een inschatting.

Materiaal	Den.[kg/m³]	Poro.[m³/m³]	H.Cap.[J/kgK]	Ther.Cond.[W/mK]	Diff.Res.Fac[-]
Pine transverse dir.	510	0,73	1600	0,13	50
Hardboard	900	0,8	1700	0,14	10
OSB	560	0,65	1700	0,12	150
Cellulose iso.	45	0,95	2150	0,039	1,5
Houtvezel iso.	35	0,95	2100	0,038	1,5
DB+	156	0,086	2300	2,3	4350
Intello	110	0,086	2300	2,3	16500

Initiële Condities

Om een inschatting te kunnen maken van de beginomstandigheden van de materialen wordt alvorens deze simulatie een andere simulatie gemaakt, waarbij de dakopbouw met redelijk hoge begincondities gedurende een jaar reeds kan uitdrogen. Hiervoor wordt een weinig vochtig binnenklimaat en het buitenklimaat van Brussel gebruikt (de woning en badkamer werden gedurende deze periode nog niet bewoond/in gebruik genomen). Aan de hand van de resultaten werden de begincondities opgesteld. Deze werden niet rechtstreeks overgenomen voor ieder dakcompartiment, maar waren eerder een indicatie van de temperatuur en relatieve vochtigheid in het dak. Zo was de verdeling over de isolatie vrij groot (zowel voor temperatuur als RV), hier werd gekozen voor het gemiddelde te gebruiken, en de simulatie de verdeling verder te laten maken.

Begincondities materialen:

Materiaal	Temp. [°C]	W. [kg/m³]	R.H. [-]
Gypsum board	20	4,7	0,6
Air layer	20	0,7	0,6
Dampscherm*	20	5,9	0,7
Pine transverse dir.	15	76	0,5
Hardboard	15	24	0,5
Isolatie	15	6,2	0,7
OSB**	10	95	0,8
Roof membrane	10	0	0,8

* Bij de OSB-plaat als dampscherm werd een R.H. van 0,4 gebruikt.

** Om de meting goed te laten overeenstemmen met de vergelijking, werd deze soms verhoogt naar 0,85. Ook werd een tweede vochtopslagcurve toegepast om de RV en het vochtgehalte beter overeen te laten stemmen. Deze was soms zeer verschillend bij ieder dakcompartiment. Toch werd er gekozen voor een zeker 'gemiddelde' tussen deze functies, voor het verder onderzoek.

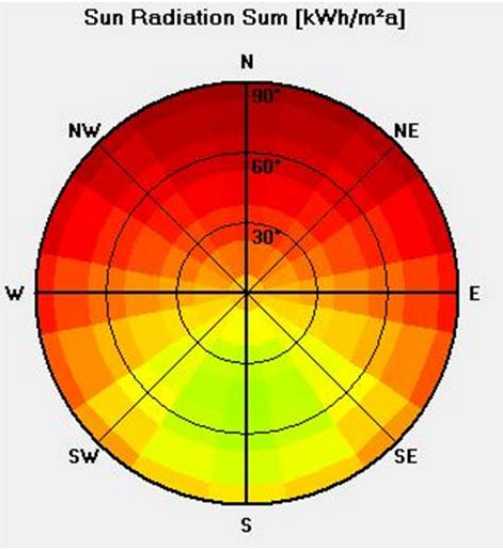
Oppervlak/Klimaat

Naast de symmetrievlakken binnen de constructie, die als 'adiabatic' worden aangegeven en geen echte grenzen zijn voor de constructie, wordt het buiten- en binnenklimaat ingesteld. Voor het binnenklimaat wordt uitgegaan van constante omstandigheden. De temperatuur wordt ingesteld op 23°C en de relatieve vochtigheid 70%. Zoals eerder besproken bij de metingen, is dit een goede benadering van de gecreëerde omstandingheden in de badkamer. Enkele andere eigenschappen zijn:

Warmteovergangscoëfficiënt α [W/m²K] =	8
Kortegolf absorptie =	0,2
Langegolf emissiviteit =	0,9

Voor het buitenklimaat wordt een specifieke klimaatfile opgesteld met behulp van de metingen ter plaatse en de stralingsgegevens van het KMI. Neerslaggegevens zijn niet voorhande, maar ook minder van toepassing voor het uitdrogen van een plat dak. We gaan er in eerste instantie vanuit dat er geen lekken zijn in de afdichting en het water ook niet blijft staan op het dak. In het verder onderzoek met simulaties van enkele jaren is een klimaatfile van 1 jaar nodig. Hiervoor zal de klimaatfile van Brussel gebruikt worden. Deze is een gemiddelde van 10 jaar en dus representatief voor het klimaat in België. Enkele eigenschappen en instellingen voor de klimaatfile te Ronse:

Gem. Temp. [°C]	9,8	Gem. RV. [%]	70
Max. Temp. [°C]	22,3	Max. RV. [%]	87
Min. Temp. [°C]	0,0	Min. RV. [%]	36



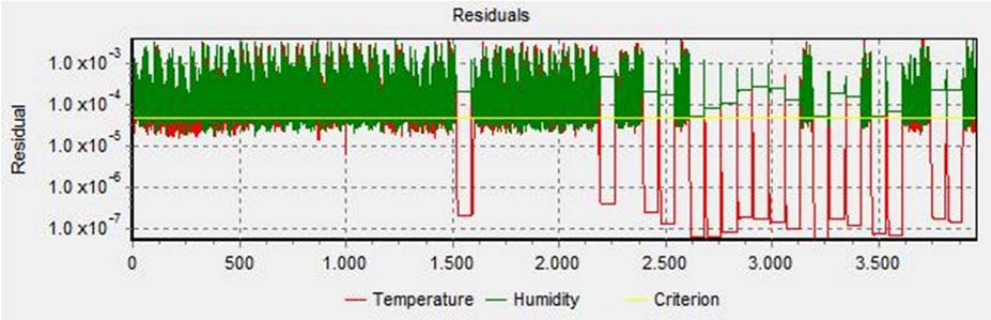
FIGUUR 66 - SOM EN RICHTING VAN DE ZONNESTRALING OP HET DAK.

Warmteovergangscoëfficiënt α [W/m²K] =	25
Kortegolf absorptie =	0,87
Langegolf emissiviteit =	0,9

BEREKENINGSINSTELLINGEN

De berekeningen worden gestart op 25/02/2014 en lopen tot en met 06/04/2014. Dit is een periode van 984 uur. Verder wordt het warmte- en vochttransport berekend zonder specifieke zaken uit te sluiten (zoals verdampingswarmte).

Als we naar de *convergence analyzer* kijken, zien we reeds een redelijke foutmarge. De residuele waardes blijven echter wel beperkt tot 10^{-3}. Er zijn wel verschillende momenten waarbij de *Adaptive time step control* in werking treedt: 18 maal, waarvan 9 maal succesvol en de iteratie verdergaat. Bij de andere 9 punten wordt deze stopgezet en overgegaan naar de volgende tijdstap.

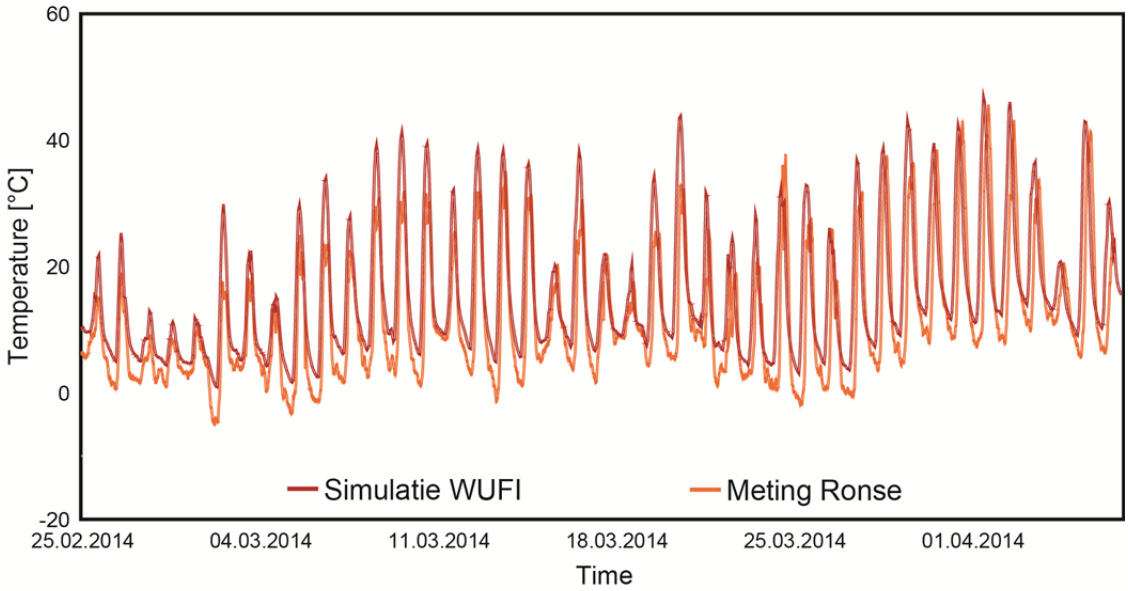


FIGUUR 67 - CONVERGENTIE ANALYSE UIT WUFI.

7.1.2 Resultaten

Uit de vergelijking tussen de metingen en de resultaten van de simulaties zijn weinig conclusies te trekken over welke materialen nu de beste zijn voor de opbouw voor een compact plat dak. De verschillende materialen zullen verder besproken worden in de onderzoekscases. Het is hier eerder de bedoeling aan te tonen dat de waardes in dezelfde grootteorde liggen, en dezelfde tendensen zichtbaar zijn.

Voor de **temperatuur** is er een goede overeenkomst tussen de metingen en de simulaties. De overeenstemming tussen de metingen van de temperatuur onderling was ook al zeer goed. Vooral onder invloed van de zonnestraling is te zien dat de temperatuur van het dak hoog kan oplopen gedurende de middaguren. Dit is zeer belangrijk omdat de temperatuur binnen het dak een zeer grote rol zal spelen in het uitdrogen ervan. Enkel 's nachts zien we dat de temperatuur iets verder terugzakt in de metingen. De nachtelijke afkoeling naar de atmosfeer door langgolvige straling wordt in het simulatiemodel misschien niet genoeg in rekening gebracht.

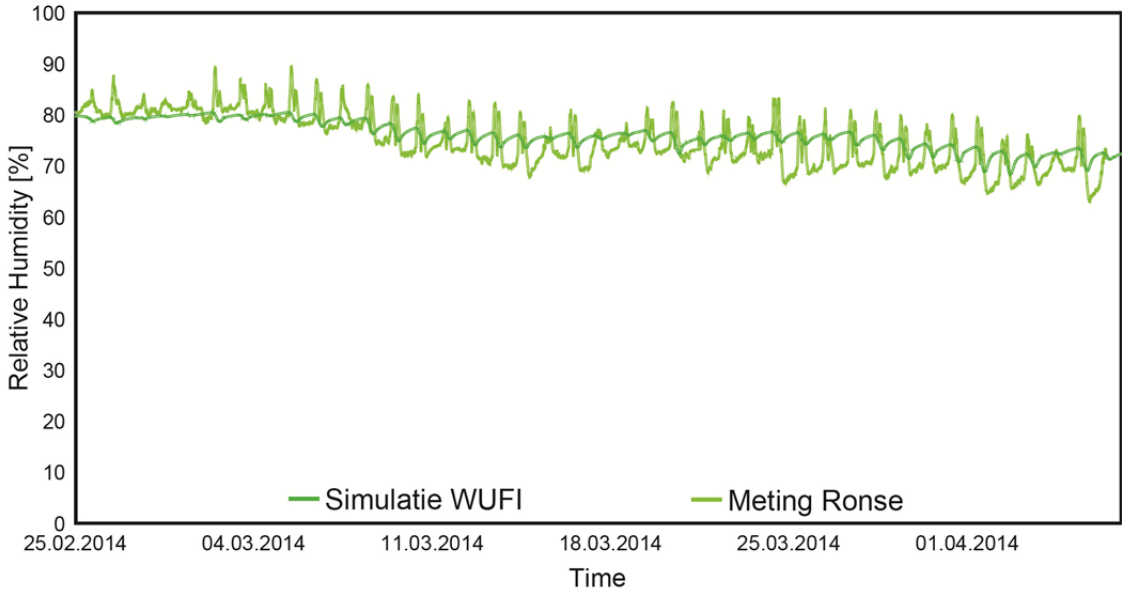


FIGUUR 68 - TEMPERATUUR COMPARTIMENT 1.

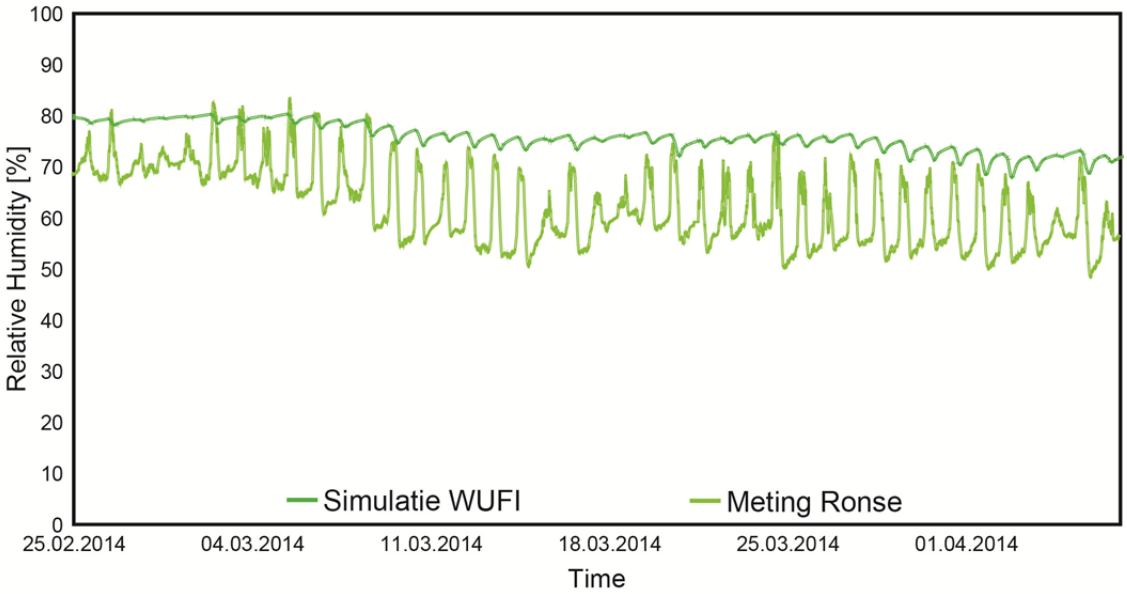
Bij de **relatieve vochtigheid** zien we een goede overeenkomst tussen de meting en de simulatie voor de eerste 4 dakcompartimenten. Bij dakcompartiment 5 tot 8 is de overeenkomst niet goed, maar dit werd reeds besproken bij de metingen. Het verloop van de relatieve vochtigheid daalt, wat aangeeft dat het dak uitdroogt, maar bij de metingen lijkt dit sneller te gebeuren dan bij de simulaties. Oorzaken hiervan kunnen liggen in het feit dat de dampweerstand van het model hoger is dan in werkelijkheid en het dak sneller uitdroogt. Een andere mogelijke oorzaak is de verdeling van het vocht bij aanvang van de simulatie. Dit is niet geweten voor

de werkelijk dakopbouw en is dus een inschatting. Ook de verstoring van de meting door luchtcirculatie binnen het dak kan een oorzaak zijn van de lagere meting (slechte vulling door het niet volledig inblazen van de isolatie totaan de OSB-plaat). Aanpassingen van het simulatiemodel konden dit echter niet aantonen.

Een tweede opmerkelijkheid is het feit dat de relatieve vochtigheid stijgt overdag, waar de relatieve vochtigheid in de simulatie net daalt. Dit werd eerder bij de metingen ook al aangehaald.

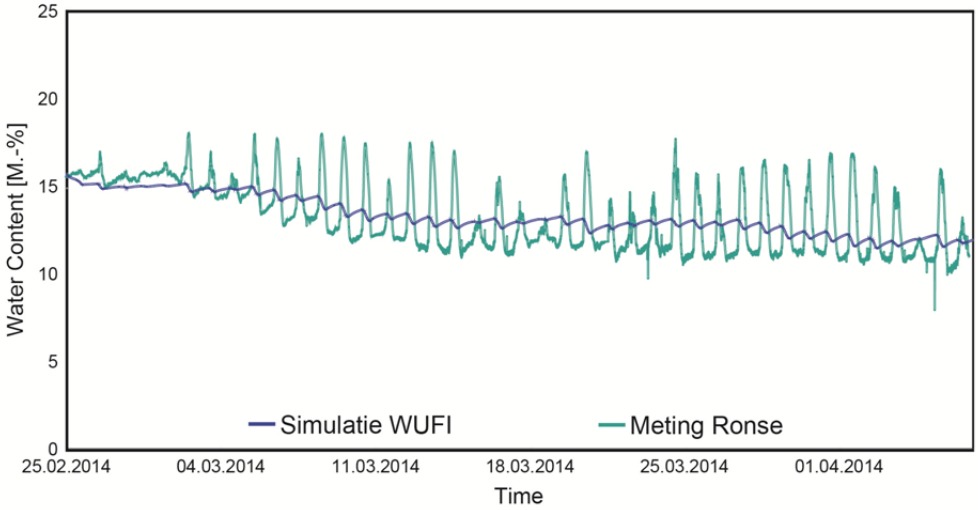


FIGUUR 69 - RELATIEVE VOCHTIGHEID COMPARTIMENT 1.



FIGUUR 70 - RELATIEVE VOCHTIGHEID COMPARTIMENT 5.

Het **houtvochtgehalte** van de OSB-plaat is in de simulatie slechts een afgeleide van de relatieve vochtigheid (adhv de *moisture storage function*), en dus zouden dezelfde neigingen hier zichtbaar moeten zijn. Voor de simulaties is dit het geval, voor de metingen niet. De verschillende dakcompartimenten liggen hier in een andere volgorde en het is dus onmogelijk hier grote conclusies uit te trekken. Om het houdvochtgehalte overeen te laten komen met de metingen dient de vochtopslagcurve voor ieder compartiment individueel aangepast te worden, wat uiteraard niet overeenstemt met de realiteit. In alle opstellingen werd hetzelfde materiaal gebruikt (enkele kleine afwijkingen zijn wel mogelijk). De overeenkomst tussen beiden is hier van minder belang. Alle resultaten van de verschillende dakcompartimenten zijn te zien in bijlage D.



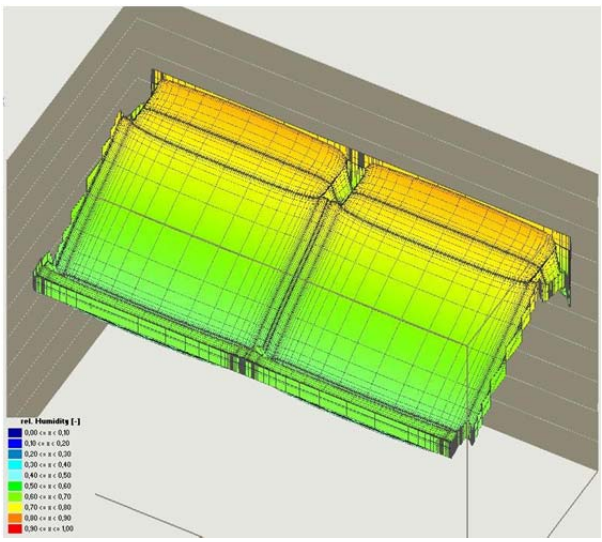
FIGUUR 71 - VOCHTGEHALTE COMPARTIMENT 3.

7.2 ONDERZOEKSCASES

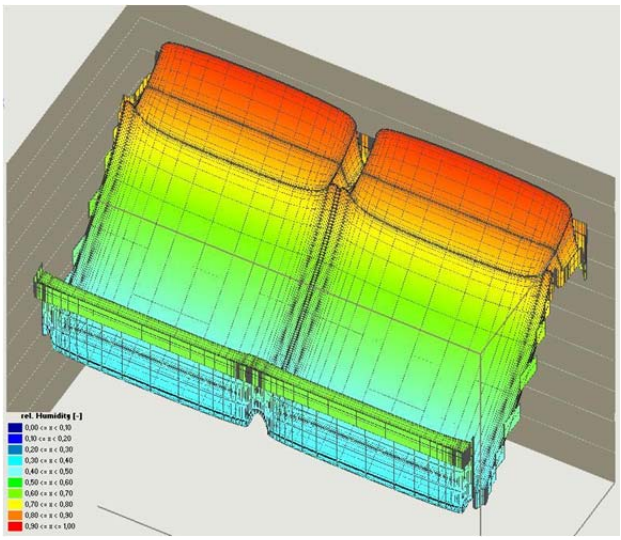
7.2.1 INLEIDING

VOCHTVERLOOP STANDAARD DAKCONSTRUCTIE

Voor we verschillende aspecten van het compacte platte dak onderzoeken, bekijken we eerst het vochtverloop binnen de constructie om te kijken waar de kritieke punten zich bevinden en wat mogelijk is om de constructie te verbeteren.

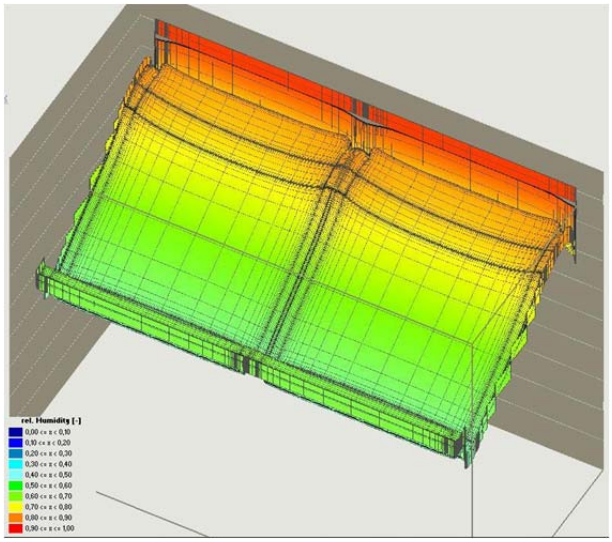


FIGUUR 72 - RV DAKCONSTRUCTIE 1/11.

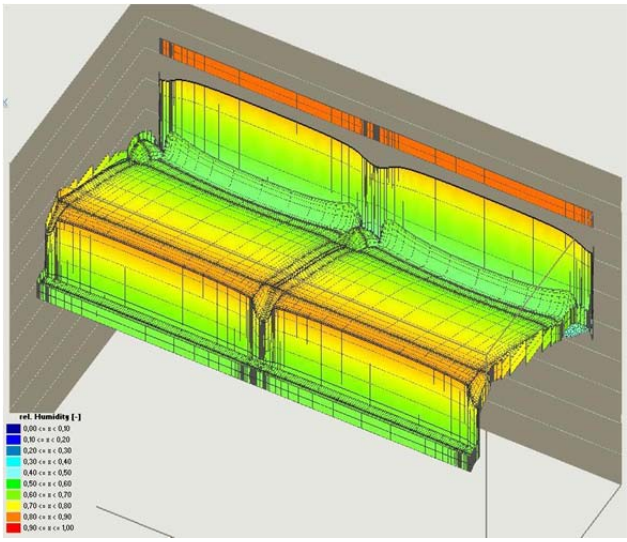


FIGUUR 73 - RV DAKCONSTRUCTIE 1/02.

Voor de winter (1/11) is te zien dat de relatieve vochtigheid licht begint te stijgen bovenaan in de constructie. Het vocht wordt getransporteerd doorheen de isolatie, het vochtgehalte in de hellingsspieën en OSB-plaat is op dit moment nog relatief laag. Gedurende de wintermaanden (1/02) zal het vocht in het dak zich verder en verder naar boven verplaatsen. Onderaan tegen het dampscherm is deze zeer laag (wat bij de vochtgestuurde damprem zorgt voor een hogere diffusieweerstand). Bovenaan de constructie stijgt de relatieve vochtigheid tot 80-90%, en zal de OSB-plaat dit vocht verder opnemen.

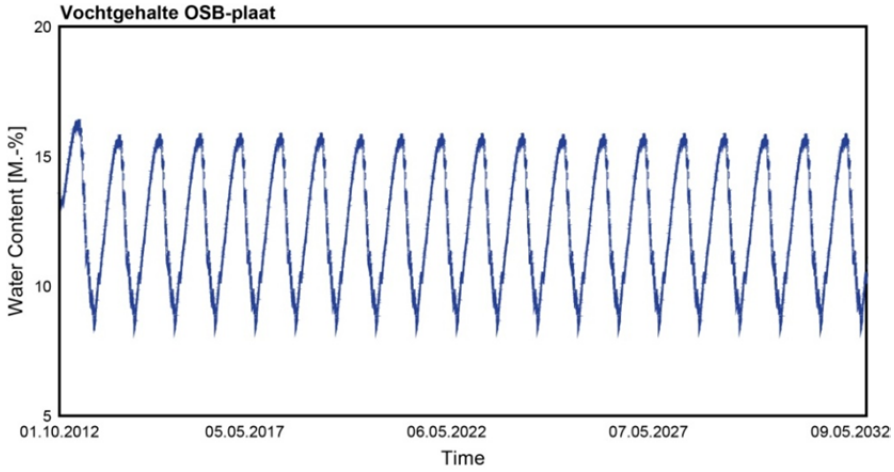


FIGUUR 74 - RV DAKCONSTRUCTIE 1/05.



FIGUUR 75 – RV DAKCONSTRUCTIE 1/08.

Na de winter (1/05) stijgt de temperatuur bovenin het dak door de straling van de zon. Dit zorgt ervoor dat het vocht in de constructie naar binnen geduwd wordt en de relatieve vochtigheid bovenin de isolatie terug afneemt. Voor de OSB-plaat en hellingsspieën duurt het iets langer alvorens ook hier het vochtgehalte terug daalt. In de zomer (1/08) droogt het dak verder uit: de relatieve vochtigheid van de isolatie tegen het dampscherm bereikt nu waarden rond de 80% (het vochtgestuurde dampscherm zal nu meer dampopen zijn). Bovenin de constructie is het vocht nu bijna volledig weggetrokken, ook in de OSB-plaat, hellingsspieën en spanten. Deze cyclus kan nu volledig opnieuw beginnen. Belangrijk is dat na een jaar het vochtgehalte van de volledige constructie niet hoger is dan het jaar voordien. De uitdrogingscapaciteit in de zomermaanden dient altijd groter te zijn dan de vochttoename in de wintermaanden. Na enkele jaren zal de constructie een evenwicht vinden, met een stijging en daling van het vochtgehalte die zich ieder jaar herhaalt.



FIGUUR 76 - VOCHTCYCLUS IN OSB-PLAAT GEDURENDE 20 JAAR.

Een tweede belangrijk punt is het vochtgehalte in de afzonderlijke constructie-onderdelen, zeker diegene die gevoelig zijn voor aantasting. Hierbij denken we vooral aan de dakvloer, hellingsspieën en spanten.

BEOORDELINGSCRITERIA

Om verdere cases te vergelijken worden enkele beoordelingscriteria opgesteld:

- Kan het initieel aanwezige vocht in de dakconstructie uitdrogen? Is de uitdrogingscapaciteit groter dan de vochtoename in de wintermaanden?

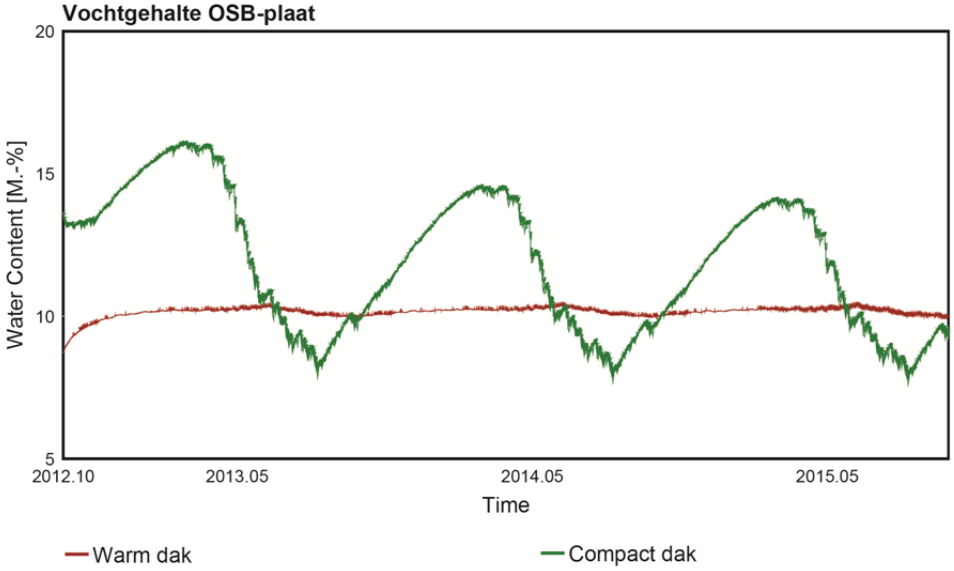
- Zijn de vochtgehaltes in de (houten) onderdelen van de constructie, ook na het bereiken van het evenwicht, voldoende laag om biologische degradatie te vermijden?

    - Criterium voor schimmelgroei: **TOW 20/5** : Aantal uren dat het hout gelijktijdig een vochtgehalte heeft meer dan 20 M% en een temperatuur boven 5°C. Wanneer het materiaal langdurig in deze toestand blijft, geldt een beperkt risico op schimmelontwikkeling. Deze toestand mag zich in totaal nooit langer dan 1 maand per jaar voordoen: TOW 20/5 < 720 h/y.

    - Criterium voor houtrot: **TOW 25/10** : Aantal uren dat het hout een vochtgehalte heeft meer dan 25 M% bij een temperatuur boven 10°C. Wanneer het materiaal enige tijd (meerdere weken) in deze toestand blijft, geldt een significant risico op schimmel- en houtrotontwikkeling. Deze toestand mag zich nooit langer dan 1 week per jaar voordoen: TOW 25/10 < 168 h/y [36].

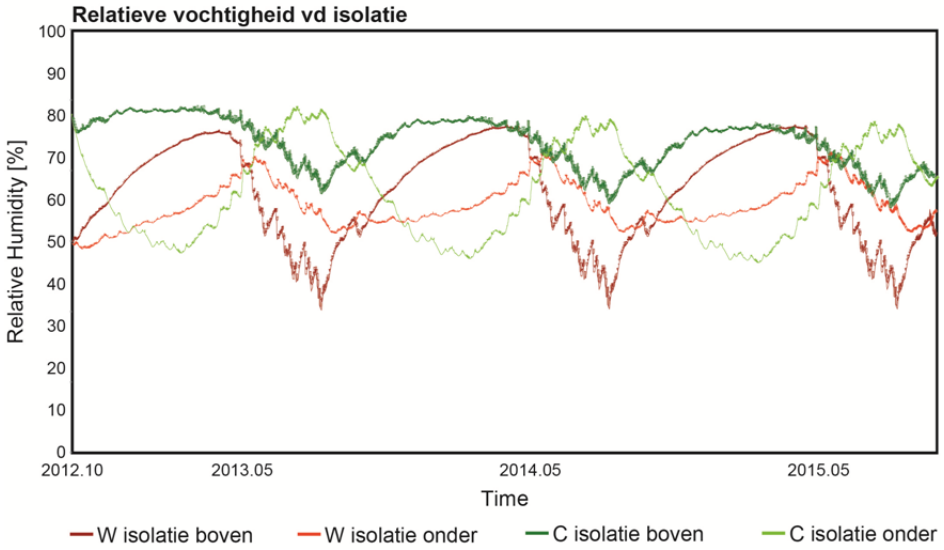
VERGELIJKING WARM DAK

Om een idee te hebben van de bereikte vochtgehaltes binnen een compact plat dak, vergelijken we deze kort met een warm plat dak, blootgesteld aan dezelfde omstandigheden met zo goed als dezelfde materialen. Het dak bestaat uit (van buiten naar binnen): Dakafdichtingsmembraan, EPS isolatie 200mm, dampscherm, OSB-plaat 18mm, luchtspouw 20mm, gipsplaat 12,5mm. We veronderstellen dat de spanten geen invloed hebben op het vochtverloop.



FIGUUR 77 - VERGELIJKING VOCHTGEHALTE WARM VS. COMPACT DAK.

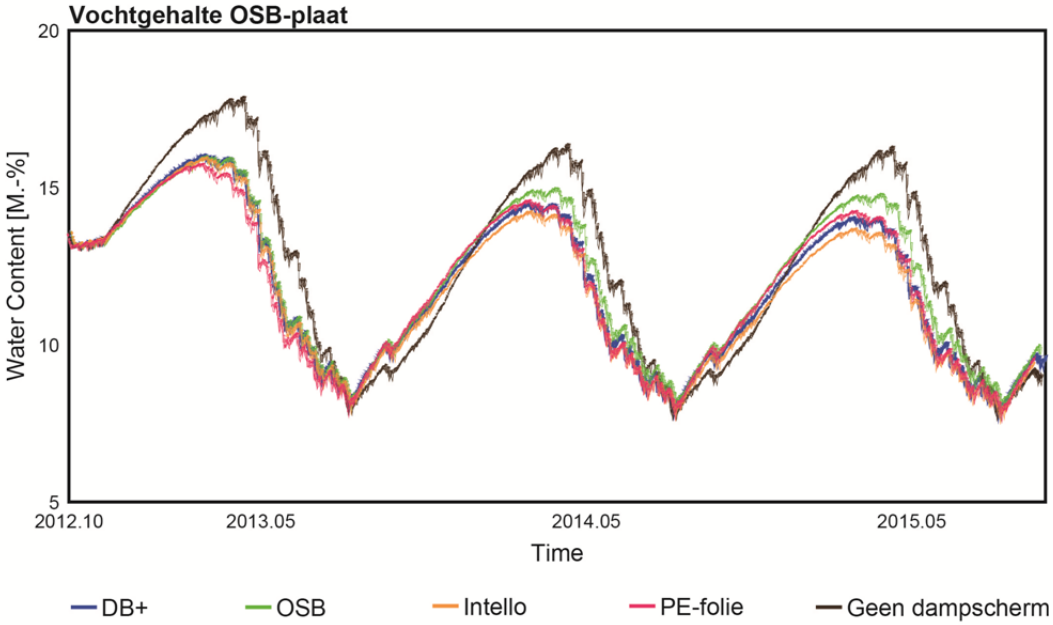
In het warme dak bevindt de OSB-plaat zich onder de isoltie en het dampscherm. Het vochtgehalte is in evenwicht met de binnenomgeving en bevindt zich rond de 10 M%. De isolatie is onderworpen aan hetzelfde fenomeen als in het compactdak, maar de spanten en dakvloer worden hiervan gevrijwaard. De relatieve vochtigheid van de isolatie bevindt zich verder in dezelfde grootteorde. De risico's op biologische degradatie zijn hier bijna onbestaande.



FIGUUR 78 - VERGELIJKING RELATIEVE VOCHTIGHEID WARM (W) VS. COMPACT DAK (C).

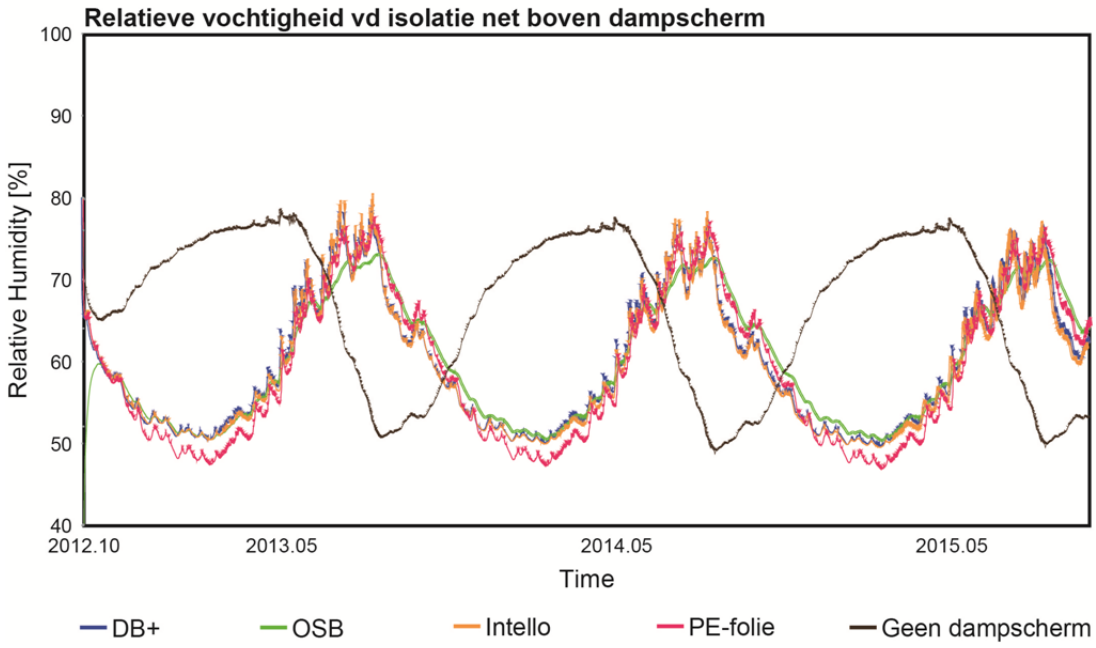
7.2.2 CASE 1: DAMPSCHERMEN

Een eerste onderzoekspunt is de keuze van het dampscherm. In de testopbouw werden, zoals eerder besproken, 4 mogelijke dampschermen gebruikt, maar uit de metingen zijn geen grote conclusies te trekken rond welke damprem nu het best presteert. Het houtvochtgehalte van alle compartimenten was lager dan 20 M% (net na de winter), wat toch aangeeft dat er bij geen enkele variant voorlopig een risico is op degradatie.



FIGUUR 79 - VERGELIJKING DAMPSCHERMEN: WC.

Bij het simuleren in WUFI komen we tot gelijkaardige conclusies. De invloed van het dampscherm op het vochtgehalte boven in de constructie is beperkt. De verschillen tussen de gebruikte dampschermen zijn klein, maar we zien toch dat de vochtgestuurde dampremmen een lager vochtgehalte hebben rond hun maximum (Intello nog beter dan de DB+). Uiteindelijk bereiken alle varianten wel hetzelfde minimum na het uitdrogen (rond 8 M%), de ene al iets sneller dan de andere. De OSB-plaat functioneert het minst goed, maar ook hier is te zien dat het uitdrogingspotentieel groot genoeg is en het vochtgehalte in de wintermaanden niet te hoog oploopt onder normale omstandigheden.

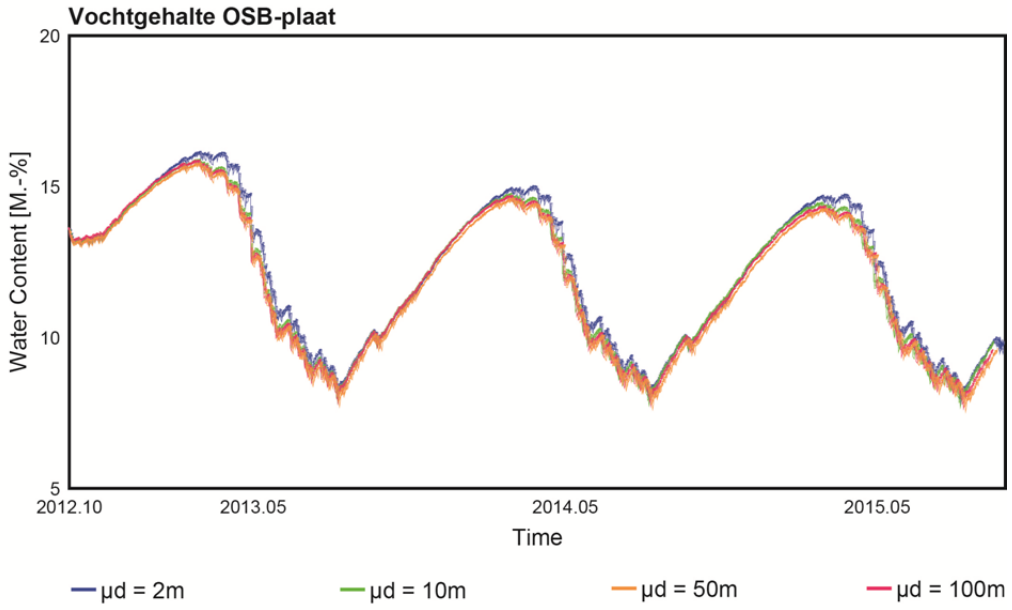


FIGUUR 80 - VERGELIJKING DAMPSCHERMEN: RV.

Een ander probleem dat kan optreden is condensatie van het vocht tegen het dampscherm in de zomermaanden. Om dit te beoordelen, bekijken we de relatieve vochtigheid van de isolatie net boven het dampscherm. Hierbij is te zien dat alle varianten een gelijkaardig verloop hebben en de RV zelden boven 80% zal uitkomen. In geen van de gevallen treedt dus condensatie op.

Om de invloed van scheuren en kleine openingen op de globale constructie te bekijken, wordt uitgegaan van een 'worst case scenario', waarbij geen dampscherm aanwezig is. Hier zijn de resultaten van de simulatie eerder verrassend: de constructie voldoet nog steeds aan de criteria. Het dak kan nog altijd uitdrogen en de vochtgehaltes overschrijden de grens van 20 M% niet. Of dit in werkelijkheid ook het geval is, is nog maar de vraag. In dit geval worden geen luchtstromen doorheen de isolatie en infiltratie van de vochtige binnenlucht meegerekend. Deze luchtstromen zullen de vochtigheid van de dakconstructie enorm doen stijgen. Bij de relatieve vochtigheid zien we een ander verloop: In de zomer zal de isolatie mee uitdrogen en in de winter het vocht opnemen.

De werking van de vochtgestuurde damprem werd reeds aangetoond, maar ook een dampscherm met constante dampdiffusieweerstand voldoet aan de voorwaarden (Nusser ea [67] constateerden geen verschil tussen de DB+ en Intello).We bekijken verder welke constante dampdichtheid de beste resultaten geeft aan de hand van de PE-folie.

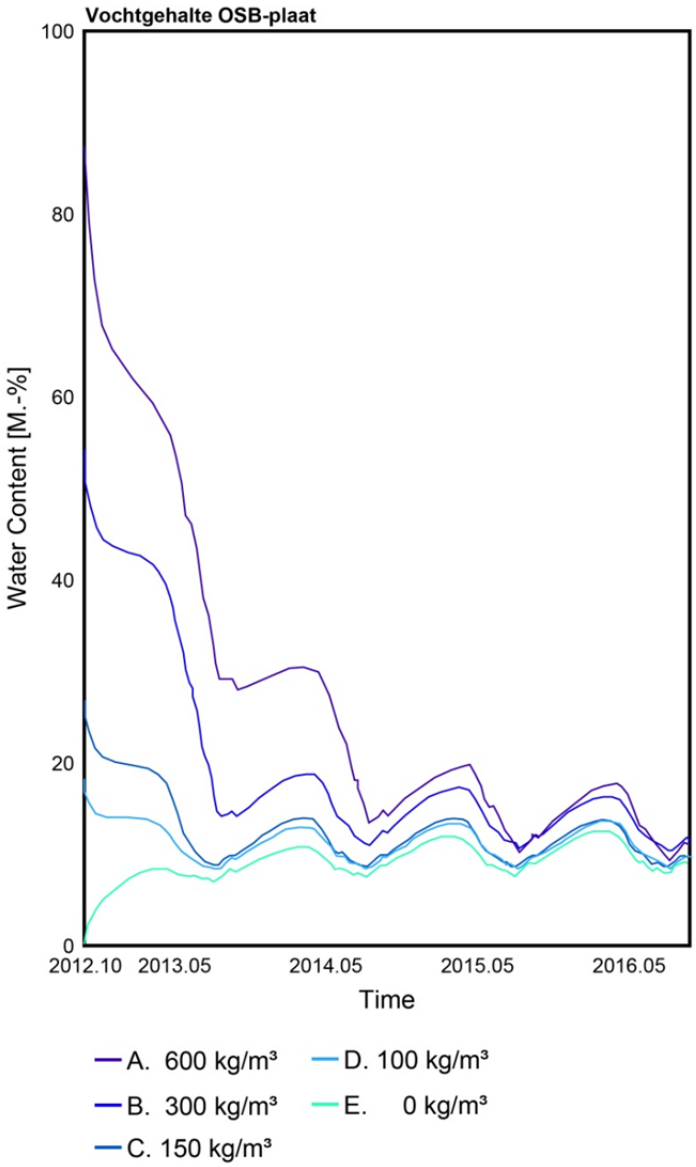


FIGUUR 81 - VERGELIJKING DAMPSCHERM PE-FOLIE: WC.

Ook hier zijn de verschillen beperkt, maar kunnen we stellen dat een hogere dampdiffusieweerstand zorgt voor een lager maximaal vochtgehalte in de dakvloer. Ook de relatieve vochtigheid volgt hetzelfde patroon en is weinig verschillend (zie resultaten in bijlage E).

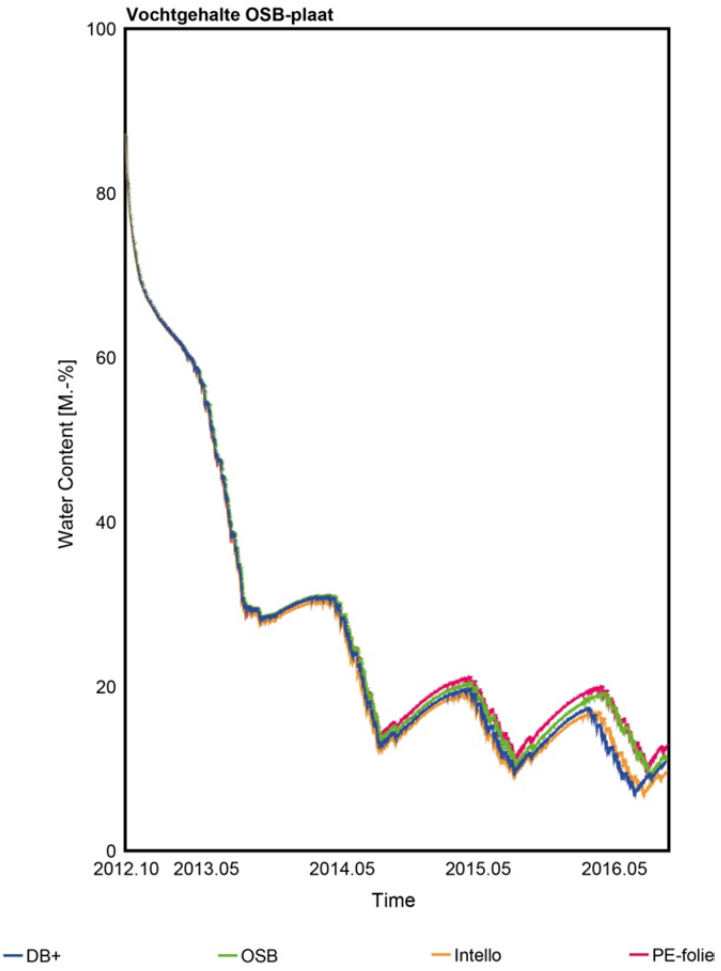
7.2.3 Case 2: Initieel vochtgehalte

Bij het afwerken van het dak is het altijd mogelijk dat een bepaalde hoeveelheid vocht ingesloten wordt in de dakstructuur, met als grootste oorzaak neerslag tijdens de werken. Essentieel voor de verdere levensduur van het dak is dat het dak zo snel mogelijk uitdroogt, zonder schade op te lopen. Om dit te onderzoeken wordt het initieel vochtgehalte van de OSB-plaat verhoogt.



FIGUUR 82 –INITIEEL VOCHTGEHALTE DB+ : WC.

Bij verschillende eerdere onderzoeken werd water toegevoegd in de constructie om neerslag te simuleren [25]. Realistische waardes liggen rond 25 M% of 150 kg/m³. Om het volledige uitdrogingspotentieel van de constructie te bekijken, verhogen we deze ook tot 300 kg/m³ en 600 kg/m³. Wanneer het dak geplaatst wordt voor de winter (1/10), zien we voor optie C 150 kg/m³ dat de dakvloer verder geen vocht opneemt en direct uitdroogt naar de binnenzijde van de constructie. Na één volledige zomer bereikt deze bijna de evenwichtstoestand. Grote risico's op biologische aantasting zijn hier niet aan verbonden. Bij enorme hoeveelheden vocht in de dakvloer duurt het langer om de constructie te laten uitdrogen en wordt het evenwicht slechts na 3 tot 4 jaar bereikt. Bij volledige bezonning van het dak is de mogelijkheid tot uitdroging van het dak dus zeer groot.



FIGUUR 83 - INITIEEL VOCHTGEHALTE VERGELIJKING DAMPSCHERMEN: WC.

Deze evolutie geldt voor alle geteste dampschermen. Het intello-dampscherm zal het snelste uitdrogen, maar wordt op de voet gevolgd door de andere dampschermen. De verschillen zijn hier werderom klein.

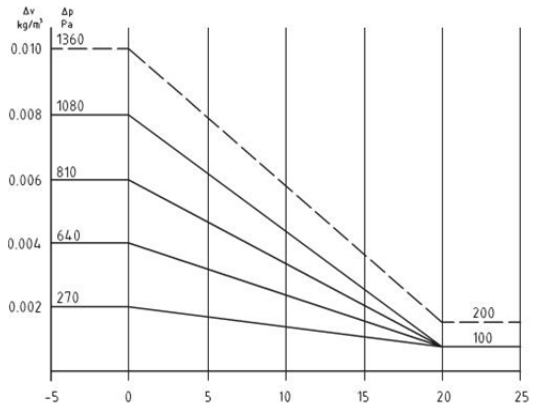
7.2.4 CASE 3: BINNENKLIMAAT

Een volgende parameter die we bekijken is het binnenklimaat. De vochtbelasting van het dak langs de binnenzijde bepaalt mee de hoeveelheid vocht die wordt opgenomen en de mogelijkheid om uit te drogen. Hetzelfde dak kan boven een woonkamer/slaapkamer gelegen zijn of boven de keuken/badkamer. Deze verschillende gebruiken werden opgenomen in klimaatsklassen en onderverdeeld volgens verscheidene criteria. De belangrijkste zijn opgenomen in WUFI en worden hier toegepast op basis van de klimaatfile van Brussel. Een eerste paar zijn curves opgesteld door WUFI:

- Low moisture load, indoor condition (Gem. temp. = 21°C; Gem. RV. = 45%)
- High moisture load, indoor condition (Gem. Temp. = 21°C; Gem. RV. = 55%)

Vervolgens komen de klimaatsklasses volgens norm EN ISO 13788 [6] aan bod, met de binnentemperatuur ingesteld op 20°C:

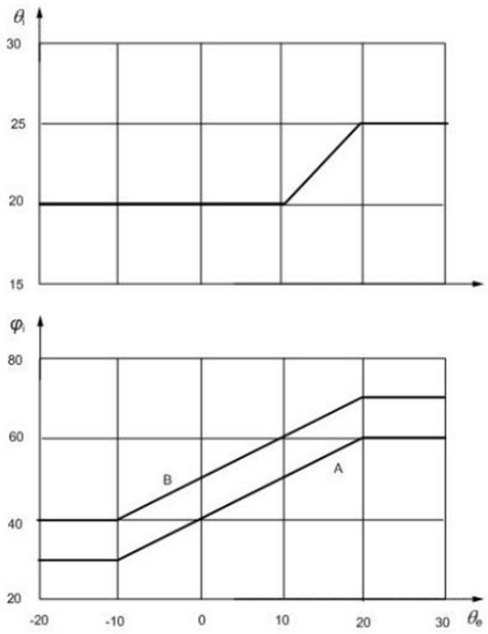
- Klimaatsklasse 1: Opslagruimtes
- Klimaatsklasse 2: Kantoren, winkelruimtes
- Klimaatsklasse 3: Woningen met lage bezetting
- Klimaatsklasse 4: Woningen met hoge bezetting, sportruimtes, keukens, kantines,..
- (Klimaatsklasse 5: Speciale gebouwen, bijv. wasserij, brouwerij, zwembad)



FIGUUR 84 - ONDERVERDELING KLIMAATSKLASSES EN ISO 13788 [6].

We vergelijken deze ook met de randvoorwaarden opgesteld in norm EN ISO 15026 [7]:

- A : Normal moisture load (normale bezetting)
- B : High moisture load (hoge bezetting)

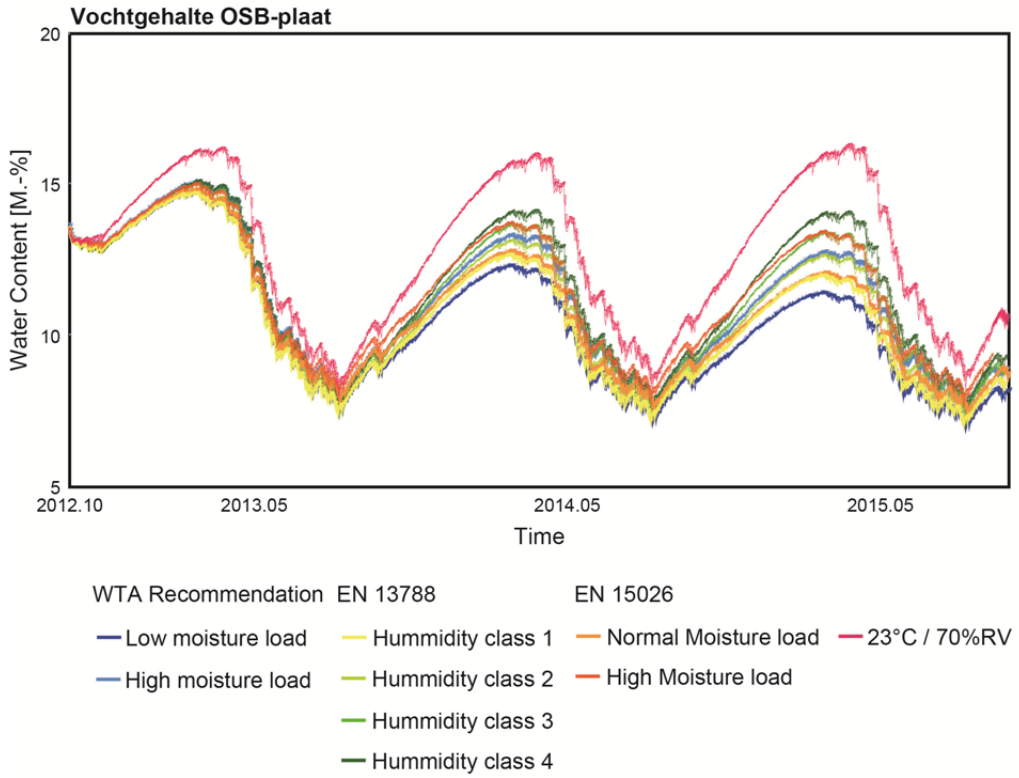


FIGUUR 85 - TEMPERATUUR EN RV VOLGENS EN ISO 15026 [7].

De invloed van deze vooropgestelde binnenklimaten wordt verder vergeleken met de testcondities waaraan het compacte dak te Ronse werd blootgesteld:

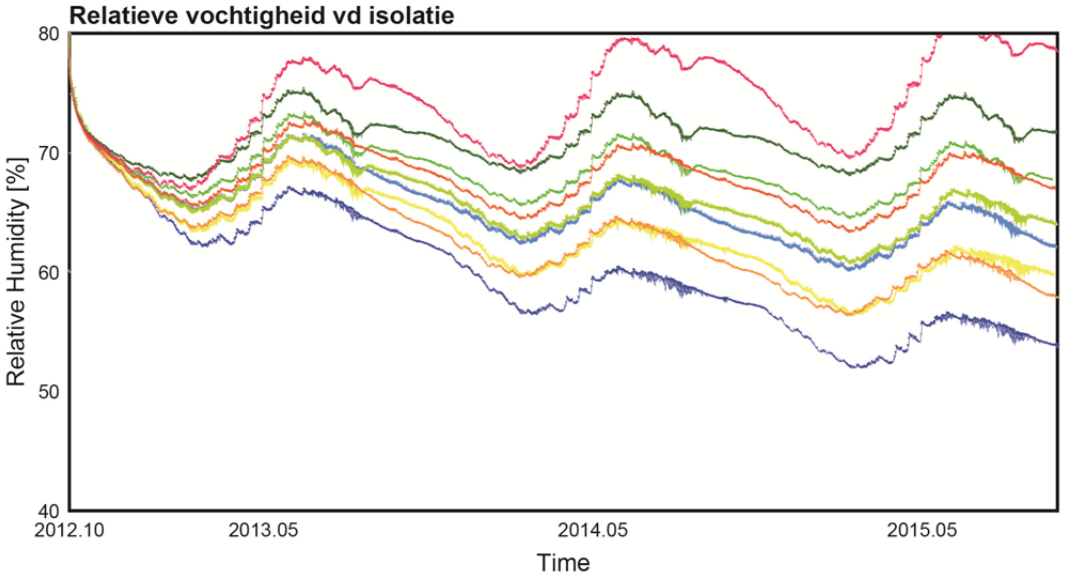
- Constante temperatuur: 23°C en constante relatieve vochtigheid: 70%

Het verloop van de temperatuur en de relatieve vochtigheid van ieder binnenklimaat bevindt zich in bijlage E. Het initiële vochtgehalte van de dakvloer is 76 kg/m³ of 80% RV, alsook voor de hellingsspiën. Het resultaat van de verschillende randomstandigheden wordt behandeld adhv het vochtgehalte van de dakvloer en de relatieve vochtigheid.



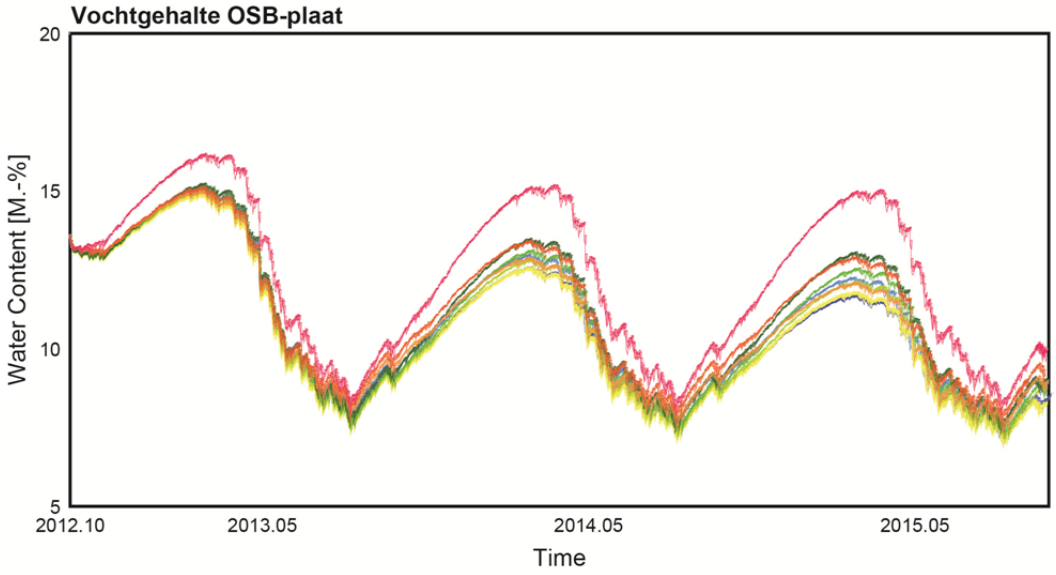
FIGUUR 86 - VERGELIJKING BINNENKLIMAAT (OSB ALS DAMPSCHERM): WC.

Alle geteste binnenklimaten voldoen aan de voorwaarden, toch heeft het binnenklimaat een grote invloed op het vochtverloop in de dakconstructie. Een eerste constatering is de impact van de testcondities in de woning te Ronse. Die is veel groter dan klimaatsklasse 4, en dan ook weinig realistisch voor een badkamer. In verdere vergelijkingen wordt het binnenklimaat iets minder belastend gemodeleerd (23°C en 60%RV of BKK 4). Verder kunnen we zien dat de impact van de 'normal moisture load' samenvalt met deze van BKK 1 en 'high moisture load' met deze van BKK 3.



FIGUUR 87 - VERGELIJKING BINNENKLIMAAT (OSB ALS DAMPSCHERM): RV.

De testcondities zorgen er zelfs voor dat het vochtgehalte in de OSB-plaat en de isolatie verder stijgt en dus niet genoeg kan uitdrogen. De mogelijk bestaat dat dit op lange termijn tot problemen kan leiden in de dakconstructie. In het geval een Intello-vochtgestuurde damprem gebruikt wordt, is dit niet het geval. Bij een hoge belasting van het compacte dak kan deze hier wel het verschil maken.



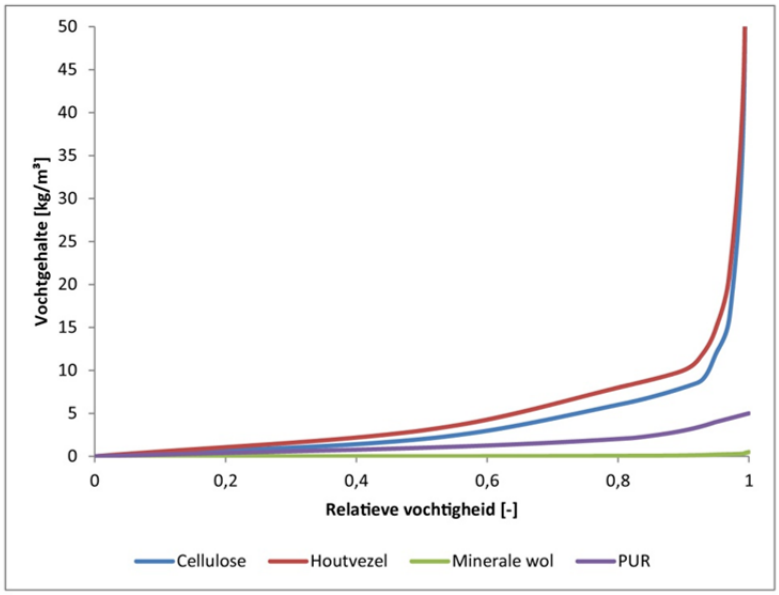
FIGUUR 88 - VERGELIJKING BINNENKLIMAAT (INTELLO ALS DAMPSCHERM): WC.

7.2.5 Case 4: Andere materialen

Case 4.1: Isolatie

Binnen dezelfde dakopbouw kan er een keuze gemaakt worden tussen verschillende materialen. Als eerste bekijken we hier de isolatiematerialen en wat hun effect is op de vochthuishouding in de dakconstructie. In de testopstelling te Ronse werden reeds twee isolatiematerialen getest: cellulose en houtvezels. Deze ingeblazen isolatiematerialen zijn vrij gelijkaardig. Ze hebben eenzelfde structuur, dampdiffusieweerstand, warmtecapaciteit, alsook sorptie-eigenschappen. Uit de materiaaltesten bleek dat de houtwol een hoger vochtgehalte had bij eenzelfde relatieve vochtigheid van de omgeving. Echter, hierbij werden beide materialen getest bij een dichtheid van 40 kg/m³. Wanneer we deze sorptie-eigenschappen omzetten naar de dichtheid waarmee deze werden ingeblazen in de structuur (35 en 45 kg/m³), zien we dat deze curves dichter bij elkaar komen te liggen.

Deze twee vochtbufferende isolatiematerialen vergelijken we met twee totaal andere materialen: Minerale wol en PUR. De sorptie-curve van deze twee materialen is veel lager, alsook de specifieke warmtecapaciteit (de sorptie-curve werd zelf ingevoerd in de materiaal-database van WUFI, op basis van resultaten uit de literatuur [60],[27]). Voor PUR-isolatie is de dampdiffusieweerstand dan weer hoger dan de andere materialen. Voor de houtvezelisolatie bekijken we ook een tweede optie, waarbij tussen de I-liggers een houtwolplaat gestoken wordt, alvorens de balken te monteren. Hierdoor is er minder kans op een slechte vulling van de minder goed te bereiken plaatsen, met het inblazen van de vezels.

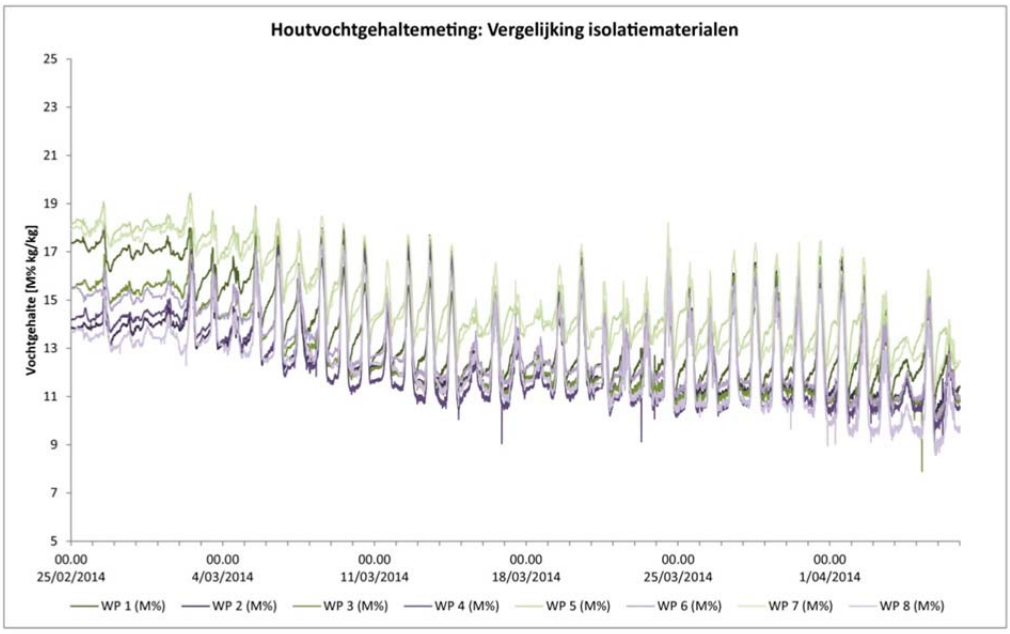


FIGUUR 89 - *MOISTURE STORAGE FUCTION* VAN DE ISOLATIEMATERIALEN.

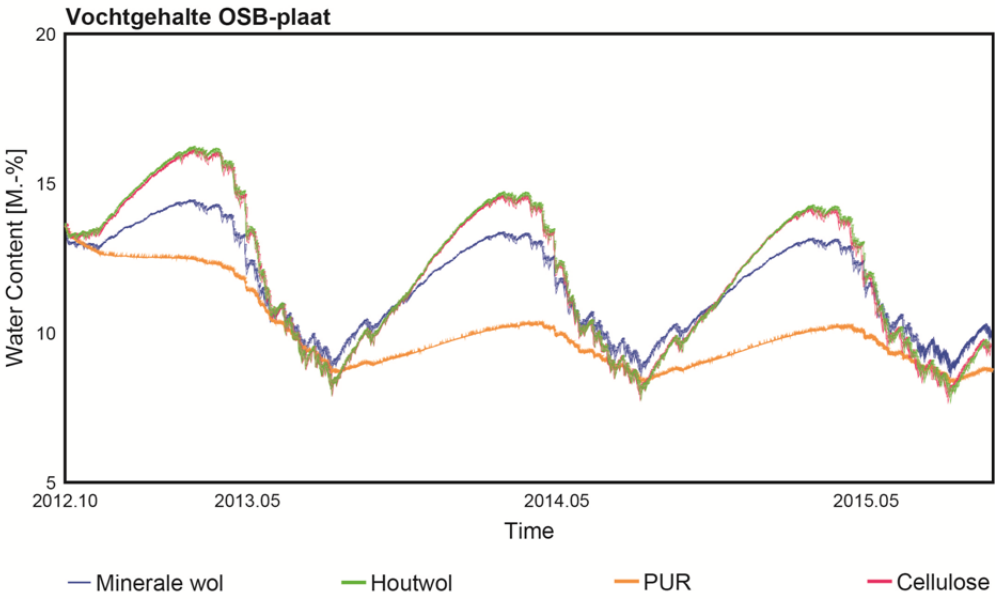
Isolatie	Den.[kg/m³]	Poro.[m³/m³]	H.Cap.[J/kgK]	Ther.Cond.[W/mK]	Diff.Res.Fac[-]
Cellulose	45	0,95	2150	0,039	1,5
Houtwol	35	0,95	2100	0,038	1,5
Houtwol-plaat	155	0,981	2000	0,042	3
Minerale wol	60	0,95	850	0,04	1,3
PUR	40	0,95	1500	0,03	50

De resultaten van de simulatie met WUFI geven aan dat het verschil tussen het gebruik van cellulose en houtvezels zeer klein is en weinig effect heeft op het vochtgehalte van de dakvloer. Uit de resultaten van de metingen is een andere conclusie te trekken: Het houtvochtgehalte is hoger bij het gebruik van houtvezelisolatie in vergelijking met cellulose, en dit voor alle dampschermen. Dit is bij de meting van het vochtgehalte rechtstreeks in de OSB-plaat. Bij de meting van de relatieve vochtigheid, net onder de OSB-plaat, is dit onderscheid minder te maken. Of dit dus ook echt zo is, dient verder onderzocht te worden.

Voor de twee andere isolatiematerialen (MW en PUR) zien we dat het vochtgehalte in de dakvloer lager is dan bij het gebruik van de vochtbufferende isolatiematerialen. Dit kan te wijten zijn aan het beperkte vochtgehalte dat het materiaal kan opnemen en dus ook transporten, zodat geen grote hoeveelheden vocht de bovenzijde van de constructie bereiken. De hogere dampdiffusieweerstand van de PUR-isolatie kan dit damptransport ook tegenhouden (het vochtghalte ligt hier nog lager dan bij de minerale wol).



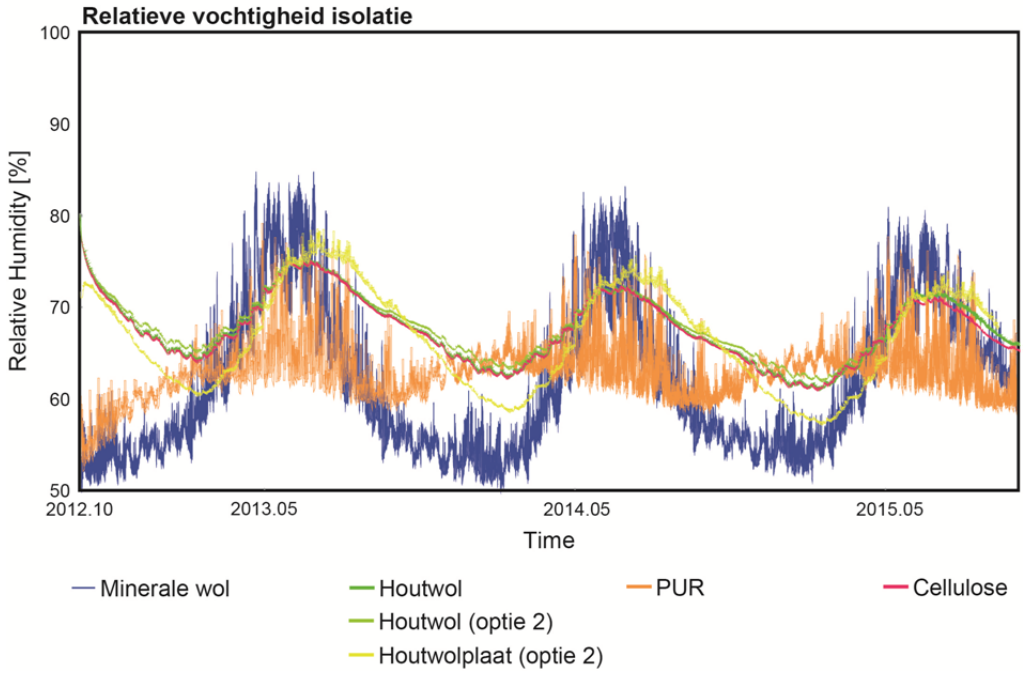
FIGUUR 90 - HOUTVOCHTGEHALTE METINGEN: HOUTWOL (GROEN) VS. CELLULOSE (PAARS).



FIGUUR 91 - VERGELIJKING ISOLATIEMATERIALEN: WC.

Wanneer we de gemiddelde relatieve vochtigheid van de isolatie bekijken, is het effect van de vochtbufferende isolatie duidelijk: de RV schommelt hier veel minder. Toch ligt de RV van de andere materialen in dezelfde grootte-orde en zal deze nooit boven de 90% uitstijgen. Bij de PUR is deze cyclus zelfs vlakker door de hoge dampdiffusieweerstand.

De invloed van de houtwolplaat op de globale constructie is beperkt binnen deze simulatie. De relatieve vochtigheid is ongeveer dezelfde als de omgevende isolatie. Het effect op de convectie binnen de constructie zal groter zijn, maar werd hier niet mee bekeken.



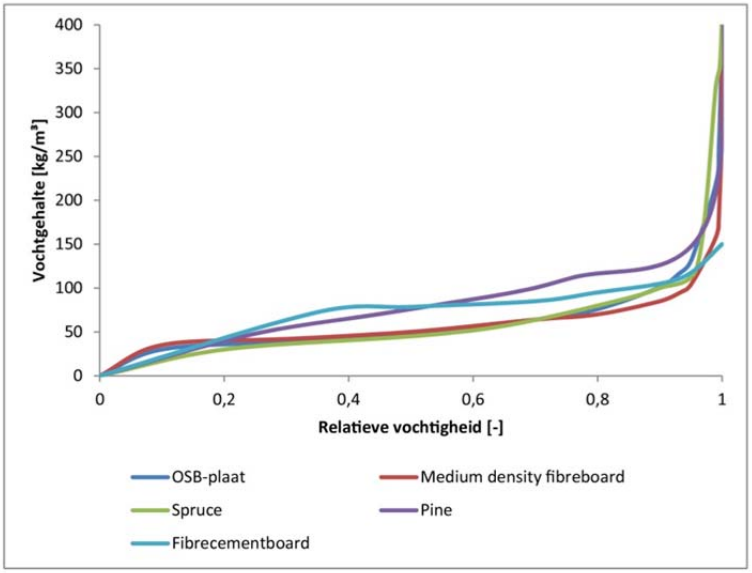
FIGUUR 92 - VERGELIJKING ISOLATIEMATERIALEN: RV.

Of we hieruit nu kunnen besluiten of minerale wol en PUR betere isolatiematerialen zijn voor dit constructietype blijft de vraag. Het is moeilijk enkel te vertrouwen op de resultaten van simulaties. WUFI werd in de eerste plaats ontwikkeld voor poreuze materialen, en het is onzeker hoe betrouwbaar deze resultaten voor vezelige materialen zijn. Eyckens [20] kwam tot dezelfde resultaten, enkel aan de hand van de simulaties. Enkel Winter ea [90] vergeleken cellulose en minerale wol in een testopstelling. Hierbij waren juist de vochtgehaltes bij minerale wol hoger dan bij cellulose-isolatie.

CASE 4.2: DAKVLOEREN

In bijna alle gevallen wordt bij de constructie van een compact dak gekozen voor een OSB-plaat als dakvloer, zo ook bij de meeste eerdere onderzoeken. Hieronder bekijken we kort wat de invloed is van een andere dakvloer. Naast de gebruikelijke OSB-plaat, kiezen we voor een vezelcementplaat en twee houtsoorten (één in dwarse richting en één in lengterichting om het verschil in opzuiging te bekijken).

De vezelcementplaat heeft een hoge densiteit, een sorptie-curve vergelijkbaar met deze van dennenhout/vuren (Pine), maar door de hoge densiteit in vergelijking met hout ligt deze, uitgedrukt in massa-procenten, veel lager. Dennenhout 1 (Pine, dwarse richting) heeft een hogere sorptiecurve, maar ook hogere dampdiffusieweerstand dan dennenhout 2 (Spruce, lengterichting). De sorptiecurve ligt hier lager, maar zo ook de dampdiffusieweerstand. We bekijken welke van deze twee parameters doorslaggevend is.



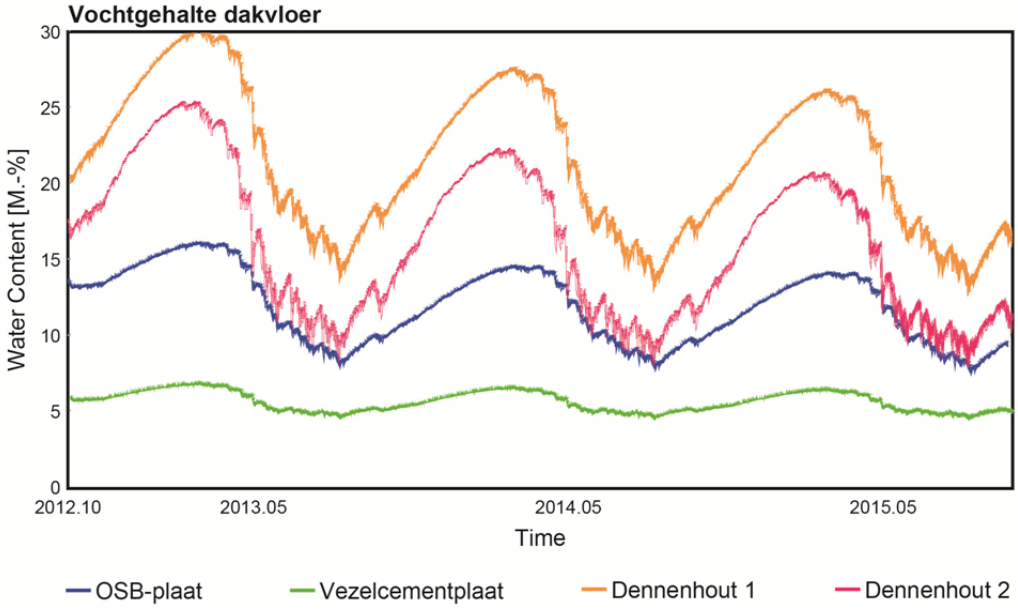
FIGUUR 93 - *MOISTURE STORAGE FUNCTION* VAN VERSCHILLENDE HOUTSOORTEN.

Dakvloer	Den.[kg/m³]	Poro.[m³/m³]	H.Cap.[J/kgK]	Ther.Cond.[W/mK]	Diff.Res.Fac[-]
OSB	560	0,65	1700	0,12	150
Fibrecementboard	1610	0,15	850	0,13	83,3
Pine transverse dir.	510	0,73	1600	0,13	50
Spruce, longitudinal	455	0,73	1500	0,23	4,3

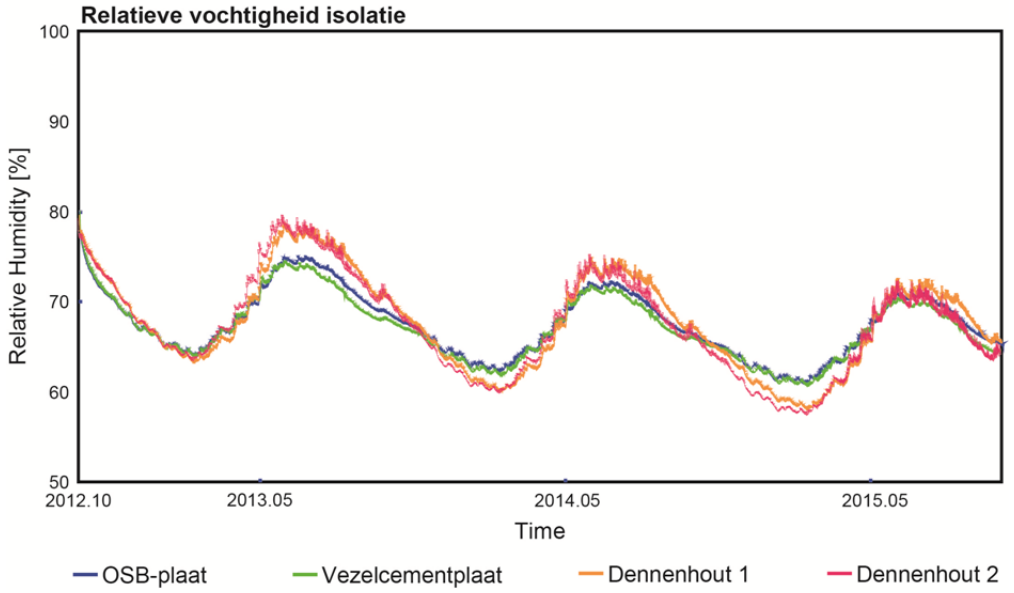
Het initieel vochtgehalte is 80% RV, wat voor de OSB-plaat overeenkomt met 76 kg/m³, voor de fibrecementboard 95 kg/m³, de *Spruce* 80 kg/m³. Het vochtgehalte van de *Pine* is 103,2 kg/m³, wat overeenkomt met 70% RV.

De resultaten van de simulatie liggen ver uit elkaar, wat het belang van de materiaalkeuze voor de dakvloer aantoont. De OSB-plaat voldoet, in goede omstandigheden (simulatie op basis van DB+ en cellulose-isolatie), ruim aan de voorwaarden. Dit kan zeker gezegd worden van de vezelcementplaat. De vochthuishouding van de dakconstructie blijft dezelfde, alsook de vochthoeveelheid in de dakvloer. Het vochtgehalte kg/kg is echter veel lager, alsook het risico op biologische degradatie (geen biologisch materiaal). De twee houtsoorten voldoen echter niet aan de criteria voor schimmelgroei en houtrot. Het gebruik van een houtsoort met een hoge sorptiecurve is zeer nefast en kan al zeer snel leiden tot schade, sneller nog dan wanneer een houtsoort met lagere sorptiecurve in de lengterichting in contact komt te staan met vochtige isolatie. Indien voor dennenhout (Spruce) met lagere sorptiecurve en de dwarse richting gekozen wordt, voldoet dit wel aan de criteria (zie case 4.3: Hellingsspieën).

De invloed van de dakvloer op de relatieve vochtigheid van de isolatie, evenals het vochttransport binnen de dakconstructie, is beperkt. Bij de keuze van een materiaal dient enkel gekeken te worden naar de vochtopslageigenschappen van het materiaal, de dampdiffusieweerstand en de gevolgen van vocht op het materiaal.

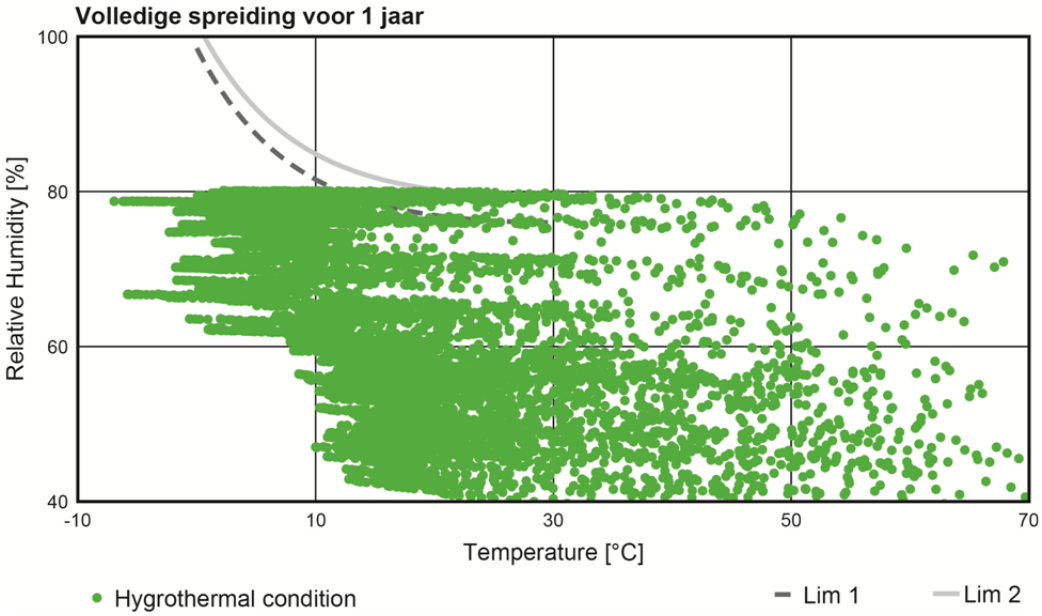


FIGUUR 94 - VERGELIJKING DAKVLOEREN: WC.

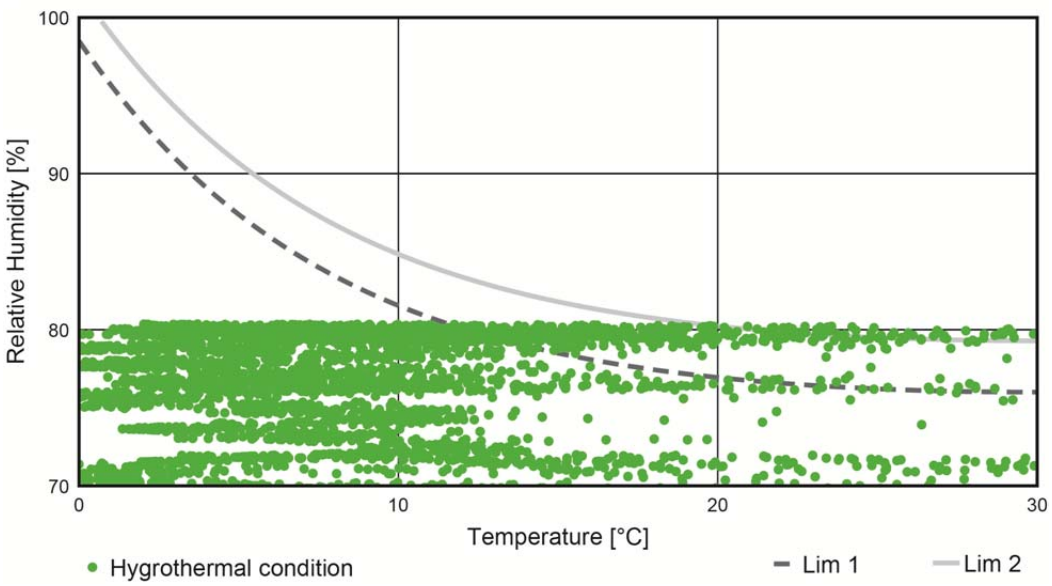


FIGUUR 95 - VERGELIJKING DAKVLOEREN: RV.

Voor de OSB-plaat bekijken we ook het isopletenmodel, door Sedlbauer [73]. De hygrothermische toestand (temperatuur en relatieve vochtigheid) wordt hier uitgezet voor 1 jaar. De spreiding van de hygrothermische toestand van de dakvloer is vrij groot, maar er zijn toch enkele momenten waarop de toestand van de dakvloer gunstig is voor schimmelgroei. LIM 1 (Lowest Isopleth for Mould) staat voor bio-afbreekbare materialen (zoals houtproducten), LIM 2 voor niet-afbreekbare materialen. De OSB-plaat behoord tot de eerste klasse, net zoals andere materialen in de dakopbouw. Het aantal punten boven de LIM is beperkt, maar er bestaat dus toch een risico op schimmelvorming op basis van deze resultaten. Het maximale vochtgehalte in de OSB-plaat is nochtans maar 16 M%.



FIGUUR 96 - ISOPLETEN DAKVLOER: OSB-PLAAT (VOLLEDIGE SPREIDING).



FIGUUR 97 - ISOPLETEN DAKVLOER: OSB-PLAAT.

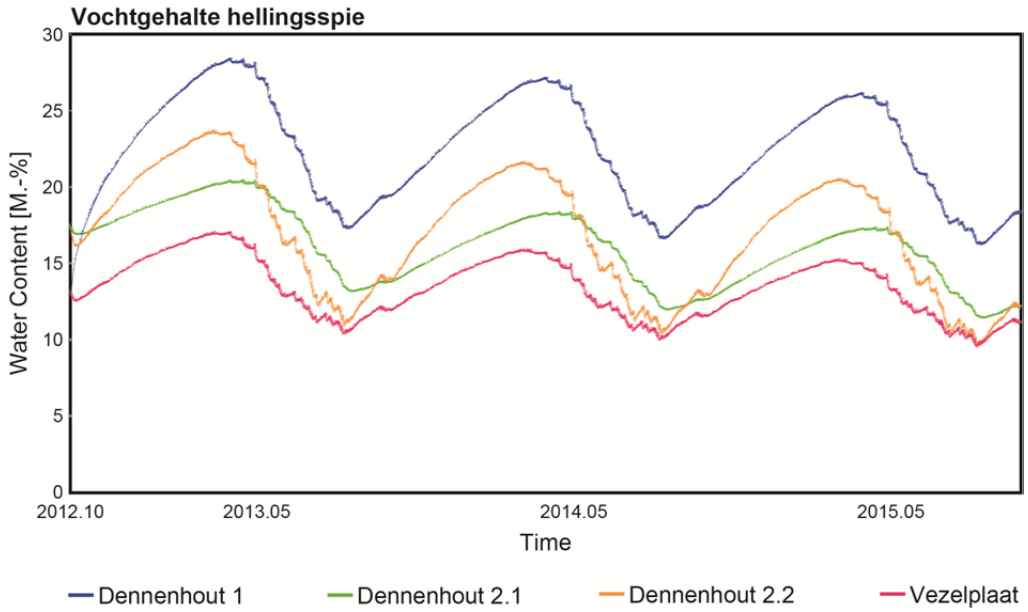
CASE 4.3: HELLINGSSPIEËN

Net als de dakvloer bevinden de hellingsspieën zich gedurende de winter in contact met isolatie met een hoge relatieve vochtigheid. Deze zullen ook vocht opnemen en in de zomer terug afgeven. De hellingsspieën bevinden zich evenwel onder de dakvloer, en de vraag is of de uitdrogingcapaciteit van deze elementen groot genoeg is.

Voor de vergelijking kiezen we terug dennenhout 1 (vuren/pine), dennenhout 2 (spruce) in dwarse richting (2.1) en lengterichting(2.2), en een vezelplaat met gemiddelde densiteit (sorptiecurve zelfde orde als OSB-plaat en Spruce, zie grafiek case 4.2 *Moisture storage function*). Het initieel vochtgehalte wordt hier voor de dakvloer en hellingsspieën ingesteld op 80% RV.

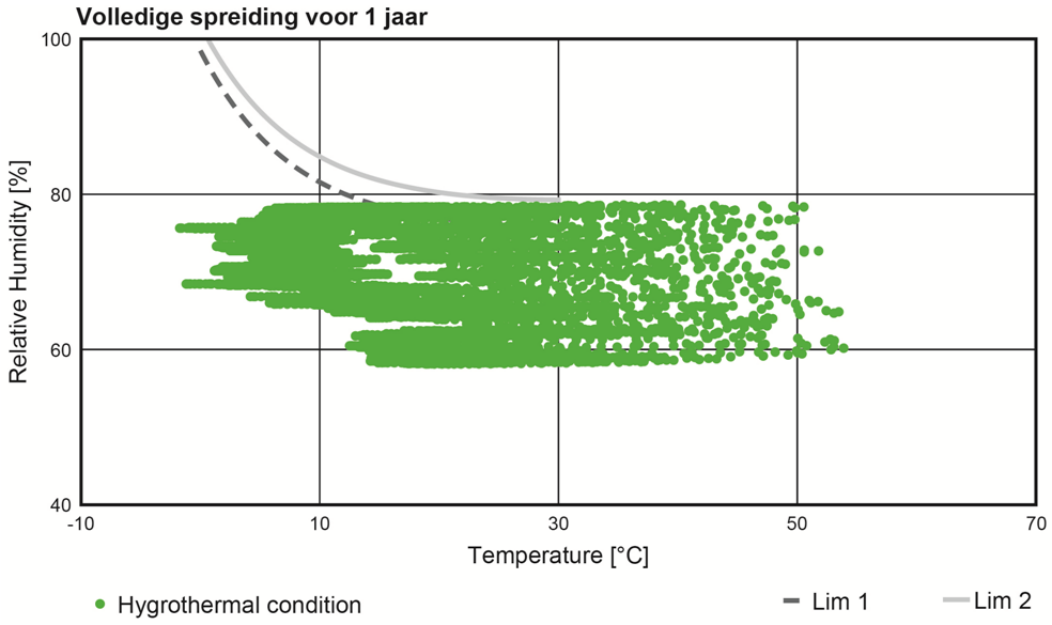
Hellingsspieën	Den.[kg/m³]	Poro.[m³/m³]	H.Cap.[J/kgK]	Ther.Cond.[W/mK]	Diff.Res.Fac[-]
Pine transverse dir.	510	0,73	1600,0	0,13	50
Spruce, longitudinal	455	0,73	1600	0,13	83,3
Spruce, radial	455	0,73	1600	0,09	130
Fibreboard	528	0,8	2000	0,1	12

Het effect op de globale constructie is beperkt, we dienen enkel te kijken naar het vochtgehalte in deze elementen. Hierbij is te zien dat de eerste houtsoort niet voldoet omwille van de te hoge sorptie-eigenschappen. De tweede houtsoort (Spruce) voldoet wel. Enkel in het eerst jaar zal, in de lengterichting en bij een initieel vochtgehalte van 80 kg/m³, het vochtgehalte een tijd boven de 20 M% uitkomen en is er een beperkt risico op schimmelontwikkeling (TOW 20/5 > 720 h/y). De houtvezelplaat voldoet zeker aan de criteria en is een goed alternatief voor de hellingsspieën in plaats van massief dennenhout.

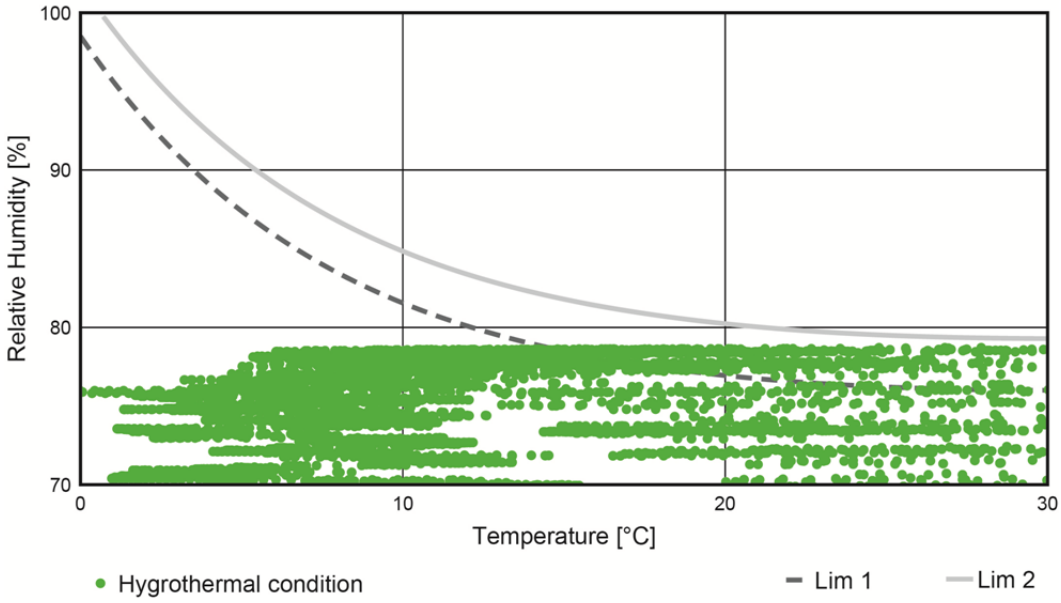


FIGUUR 98 - VERGELIJKING HELLINGSSPIEËN: WC.

Ook voor de hellingsspieën bekijken we het isopletenmodel, hier voor het dennenhout *Spruce*, in radiale richting. Het vochtgehalte zal na de eerste winter niet meer in de buurt komen van de 20 M%, en dus op basis van het criterium $TOW_{20/5}$ geen risico op schimmelvorming inhouden. De hygrothermische spreiding is hier veel minder dan bij de dakvloer, toch zal deze op sommige momenten gunstig zijn voor de groei van schimmels. Het aantal punten is hier wederom beperkt, en nooit zijn deze hygrothermische omstandigheden zeer gunstig (zeer hoge vochtigheid en temperatuur) .



FIGUUR 99 - ISOPLETEN HELLINGSPIEËN: SPRUCE (VOLLEDIGE SPREIDING).



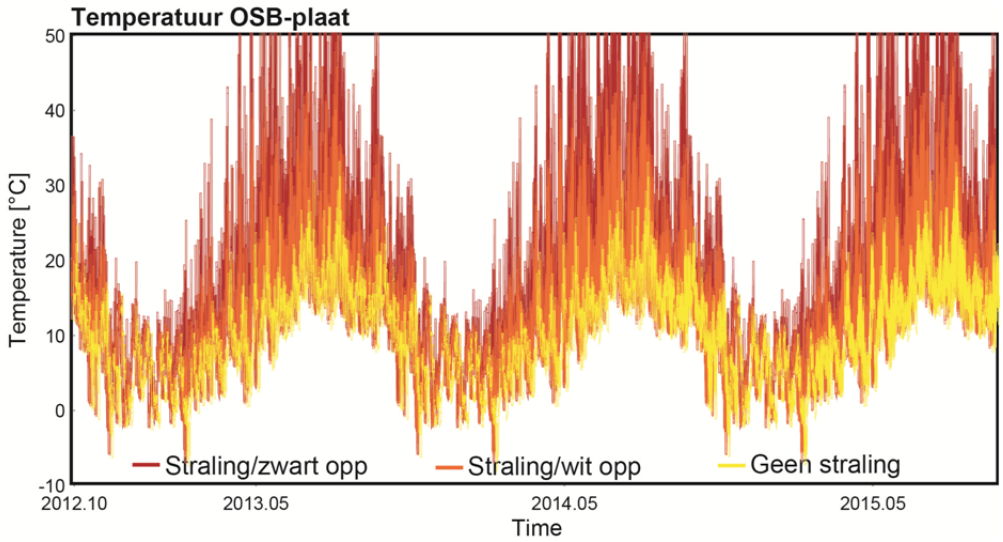
FIGUUR 100 - ISOPLETEN HELLINGSPIEËN: SPRUCE.

7.2.6 Case 5: Beschaduwing van het dakoppervlak

Een essentieel onderdeel in de werking van het compacte dak is de zonnestraling, die in de zomer zorgt voor het vochttransport naar binnen en de daarbijhorende uitdroging van het dak. Soms wordt het dak echter beschaduwd door een ander gebouw, zonnepanelen die op het dak geplaatst zijn of een groendak. In deze onderzoekscase wordt de vergelijking gemaakt tussen een dak met een zwart, bitumineus oppervlak, volledig blootgesteld aan de zon (klimaatfile: Brussel), een dak met wit oppervlak en een dak dat volledig beschaduwd is en geen straling opneemt of afgeeft. Voor de randomstandigheden wordt gekozen voor de klimaatfile van Brussel en een constant binnenklimaat, ingesteld op 23°C en 60% RV (initieel vochtgehalte dakvloer en hellingspieën 80% RV).

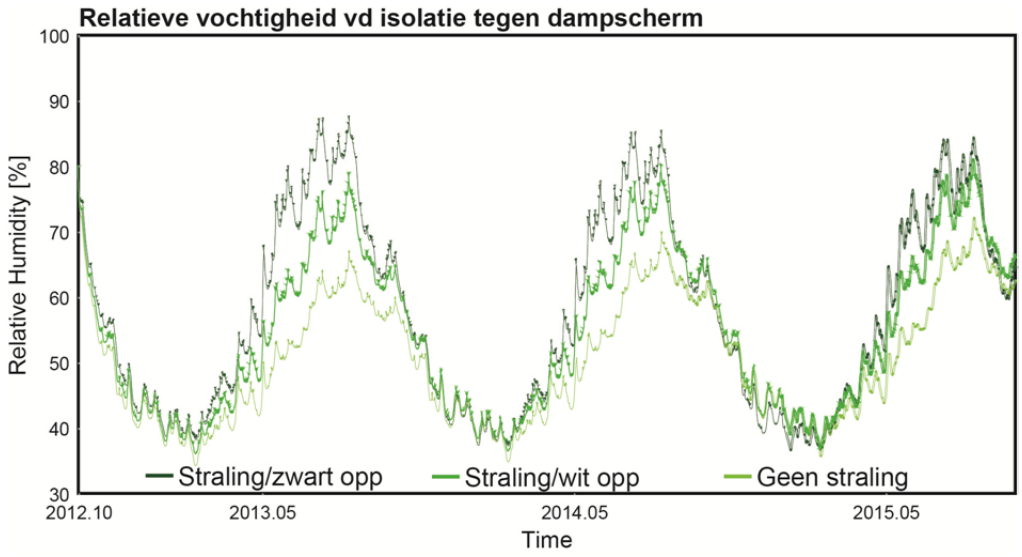
Dakafdichtingen	Adsorptie (kortgolvig)	Emissie (langgolvig)
Zwart opp	0,87	0,9
Wit opp	0,4	0,9
Geen straling	0,0	0,0

Een eerste, logisch gevolg is de temperatuur van het dak die minder hoog oploopt in het geval van een wit oppervlak, en nog minder in het geval zonder straling. In de winter is er weinig verschil te bemerken, in de zomer kan het verschil tot 20-30 °C oplopen. Deze verschillen werden eerder ook al besproken door Bludau [3], Winter ea [90] en Nusser ea [67].

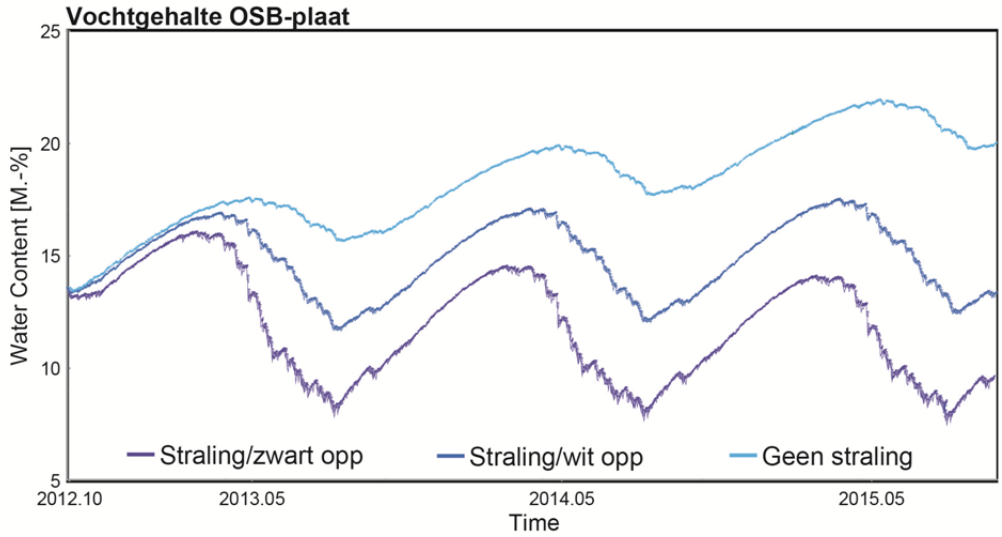


FIGUUR 101 - VERGELIJKING BESCHADUWING: TEMPERATUURSVERLOOP DAK.

De lagere temperatuur zorgt ervoor dat het vocht bovenaan in het dak na de winterperiode niet naar binnen getransporteerd wordt en zo ook niet kan uitdrogen. Wanneer we de relatieve vochtigheid onderaan de isolatie bekijken tegen het dampscherm, zien we dat deze minder hoog oploopt in het geval er minder straling op het dak is. Het vochtgehalte zal daardoor jaar per jaar verder oplopen, aangezien in de wintermaanden wel dezelfde hoeveelheid vocht de dakstructuur betreedt. Bij het gebruik van een vochtgestuurde damprem (DB+ of Intello) of een OSB-plaat zal dit na enkele jaren tot risico's op biologische aantasting leiden, terwijl het vochtgehalte blijft stijgen.



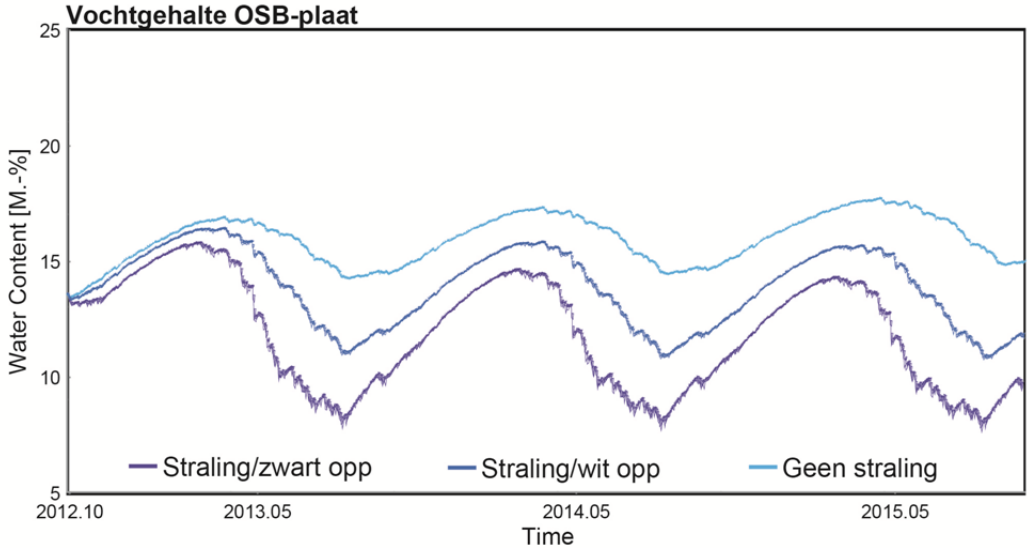
FIGUUR 102 - VERGELIJKING BESCHADUWING : RELATIEVE VOCHTIGHEID TEGEN DAMPSCHERM.



FIGUUR 103 - VERGELIJKING BESCHADUWING (DB+): WC.

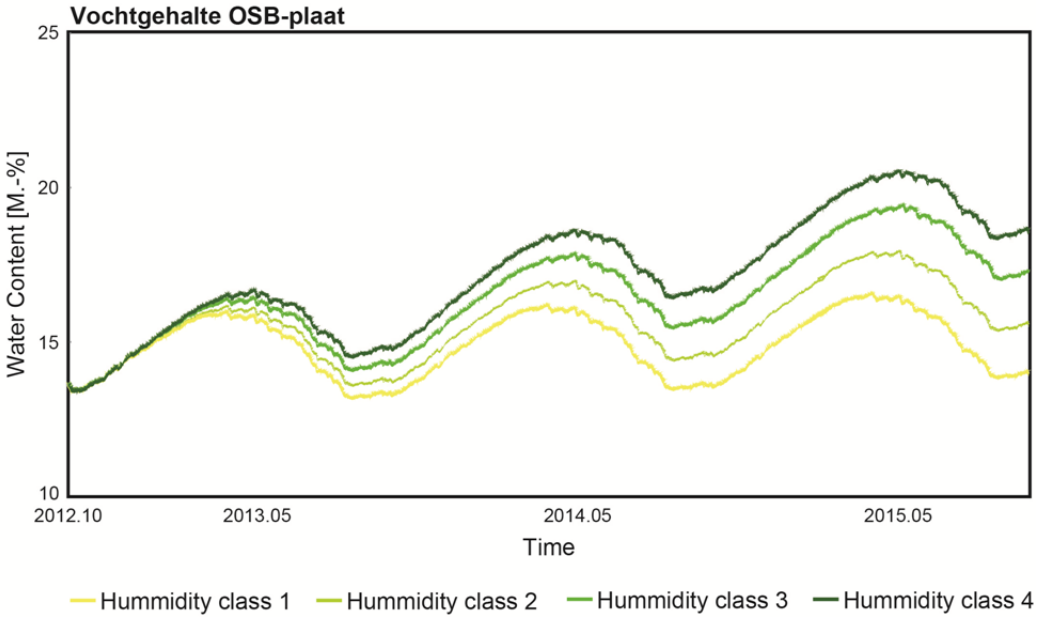
In het geval een wit dakoppervlak gebruikt wordt, krijgen we een zeer lichte stijging voor deze dakopbouwen. Het risico op schade is hier kleiner, alhoewel dit na 10 jaar of zelfs 20 jaar mogelijks kan optreden. De uitdrogingscapaciteit van het dak is net niet groot genoeg, zeker niet in het geval begonnen wordt met een hoog initieel vochtgehalte, of een lek optreedt in de dakconstructie. Echt veilig is deze dakopbouw dus niet.

De PE-folie komt als beste dampscherm uit de vergelijking. Bij de dakopbouw met een wit oppervlak is er nog uitdroging en voor het geval waarbij er geen straling is, is er slechts een lichte stijging van het vochtgehalte. Deze bemerking is ergens logisch, aangezien de lagere relatieve vochtigheid tegen het dampscherm de werking van de vochtgestuurde damprem belemmerd en het positieve effect van de variabiliteit van de dampweerstand wegvalt. Het dampscherm met een constante, hoge dampweerstand laat het minste vocht toe in de dakconstructie in de wintermaanden en zal met eenzelfde uitdrogingscapaciteit het vochtgehalte beperkt houden.



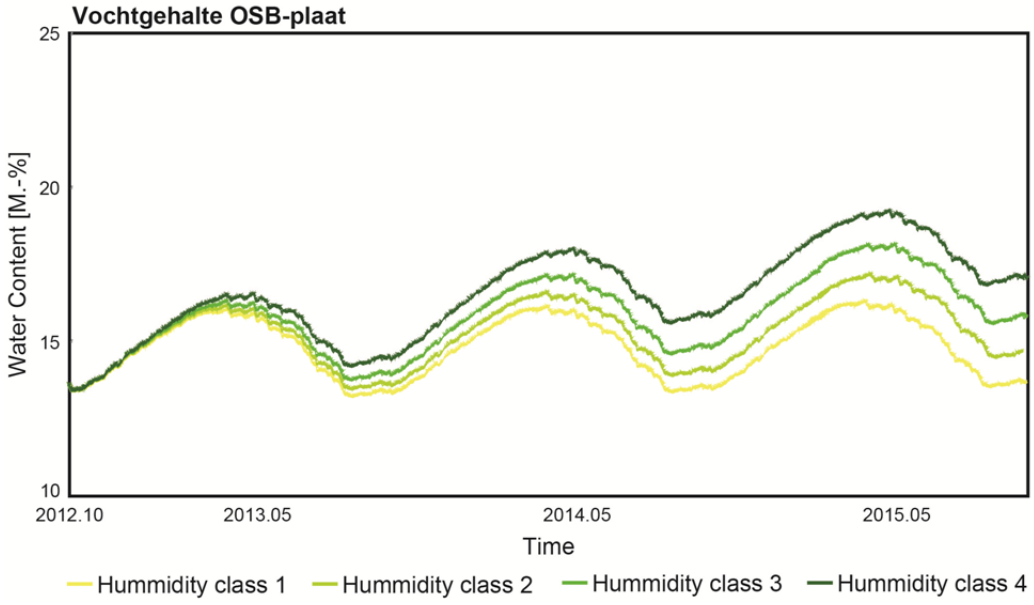
FIGUUR 104 - VERGELIJKING BESCHADUWING (PE-FOLIE): WC.

In tweede instantie bekijken we of er toch beschaduwing toegelaten kan worden, in het geval het binnenklimaat minder belastend is voor de dakconstructie. Voor de dakopbouw met een OSB-plaat als dampscherm, is te zien dat zelfs voor klimaatsklasse 1 het vochtgehalte licht blijft stijgen. Deze situatie is dus zeker te vermijden.

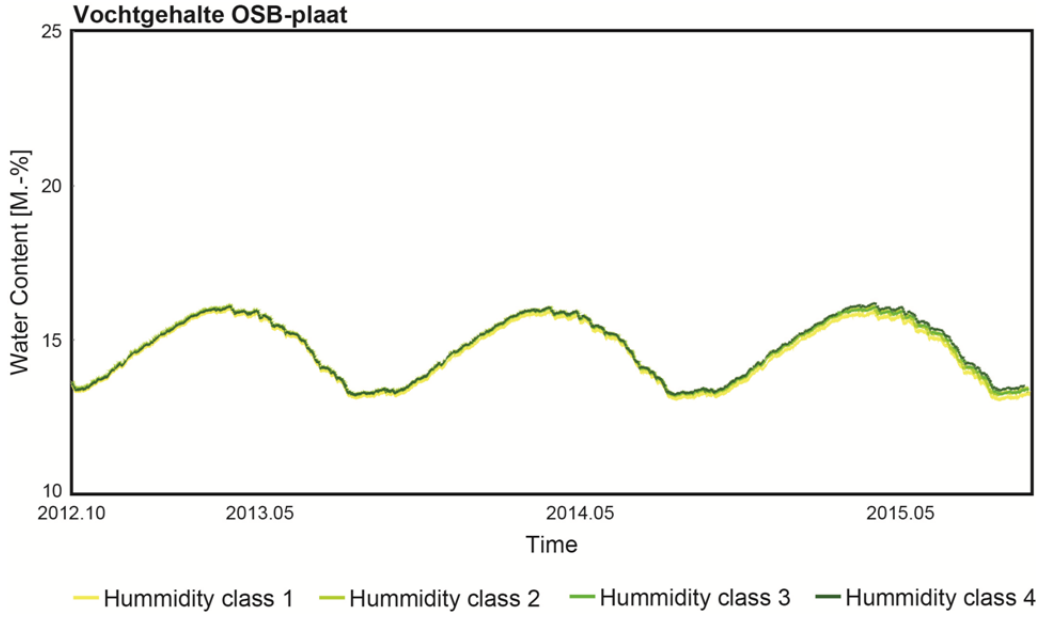


FIGUUR 105 - VERGELIJKING BESCHADUWING – BINNENKLIMAAT (OSB): WC.

Ook voor het intello-dampscherm blijft het vochtgehalte stijgen en kan er na een tiental jaar schade optreden, ook voor binnenklimaatsklasse 2 en 3. Enkel bij klimaatsklasse 1 blijft het vochtgehalte constant. Dit is echter te weinig om te kunnen besluiten dat het mogelijk is dit dampscherm te gebruiken in een woning. Bij de PE-folie is het verschil tussen de klimaatsklasses zeer klein en is er geen enkele stijging van het vochtgehalte over meerdere jaren. Het gebruik van een PE-folie, met hoge dampdiffusieweerstand, is dus mogelijk in het geval er geen zonnestraling het dakoppervlak bereikt. Dit moet echter geval per geval bekeken worden, zeker wanneer het initiële vochtgehalte nog hoger is of er lekkage in het dak optreedt.



FIGUUR 106 - VERGELIJKING BESCHADUWING – BINNENKLIMAAT (INTELLO): WC.



FIGUUR 107 - VERGELIJKING BESCHADUWING – BINNENKLIMAAT (PE-FOLIE): WC.

In eerdere onderzoeken werd reeds het gevaar op groendaken aangetoond [90],[67]. Geen van deze onderzoeken bevat echter een testopstelling over meerdere jaren, maar na één jaar blijkt het vochtgehalte in vele gevallen reeds te stijgen.

7.2.7 CASE 6: LEKKAGE

Een moeilijk in te schatten factor is lekkage, zowel onder de vorm van luchtcirculatie als vocht. Om het effect van lekkage te begroten, wordt een vochtbron/ventilatie ingebracht in het WUFI-model. In het model kunnen verschillende bronnen ingebracht worden: *Heat source, Moisture source ofAir exchange source* ('sink' genoemd bij vocht- of warmteafname).

In eerste instantie wordt een vochtbron ingebracht tussen de OSB-plaat en een hellingsspie. De grootte van deze bron wordt bepaald op basis van de regen op het dakoppervlak en vergeleken voor verschillende fracties die doorsijpelen. De berekeningen gebeuren op basis van [44]:

$$S_w = \frac{f \,.\, R}{3600}$$

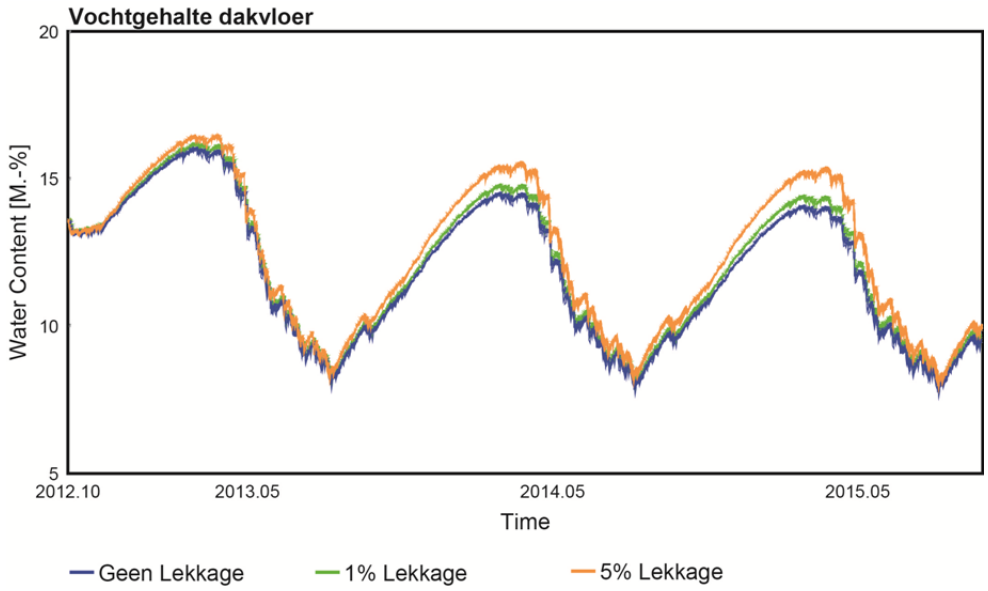
S_w	[kg/sm²]	Exterior moisture source
f	[-]	Fractie
R	[mm/h]	Driving rain on the surface

Driving rain coëfficiënt:

$$\text{Rain load R} = \text{Rain} * (\text{R1} + \text{R2} * \text{wind velocity})$$

R1 = 1,0
R2 = 0,07

Als klimaatfile voor de buitenomgeving wordt deze van Brussel gebruikt, de neerslag wordt echter bepaald aan de hand van de metingen te Holzkirchen.



FIGUUR 108 - VERGELIJKING LEKKAGE *MOISTURE SOURCE*: WC.

Het binnenbrengen van vocht in de constructie heeft uiteraard een negatief effect, maar indien dit beperkt blijft, zal het dak toch iedere zomer terug uitdrogen tot het evenwichtspunt en in de winter het vochtgehalte niet boven de 20 M% uitstijgen. Zeer lokaal kan het vochtgehalte wel hoger oplopen en een risico op degradatie inhouden.

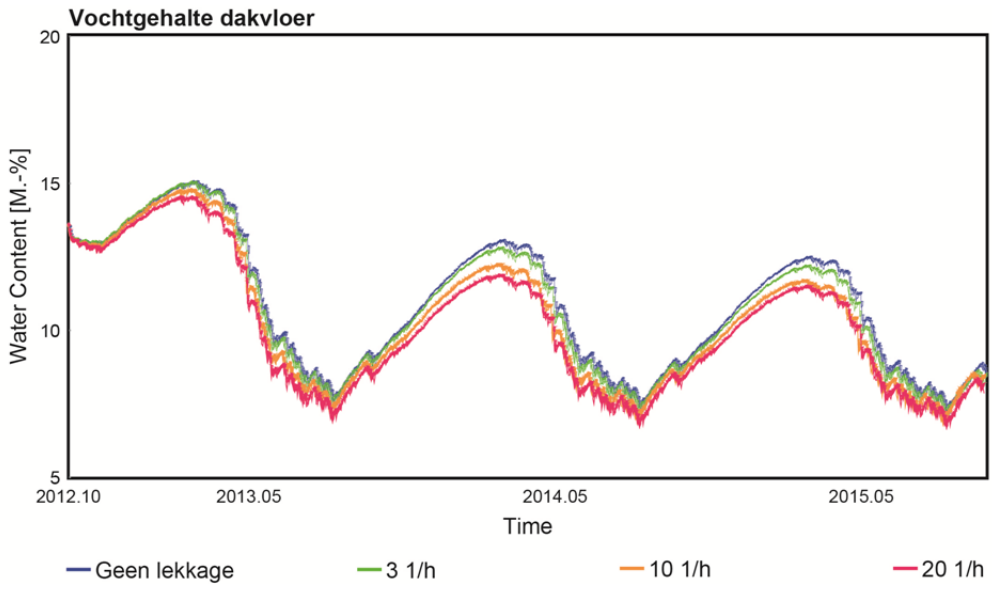
Een *Air exchange source* bestaat zowel uit een warmte- als vochtcomponent. De invloed van de warmte wordt hier buiten beschouwing gelaten. De vochtbron door ventilatie wordt bepaald aan de hand van [59],[91]:

$$S_w = \frac{ACH}{3600} \cdot d_{vent} \cdot (c_{out} - c_{vent})$$

ACH	[1/h]	Air change rate
d_{vent}	[m]	Dikte van de geventileerde laag
c_{out}	[kg/m³]	Waterdampconcentratie in de buitenlucht
c_{vent}	[kg/m³]	Waterdampconcentratie in de geventileerde laag (gem. over elementen)

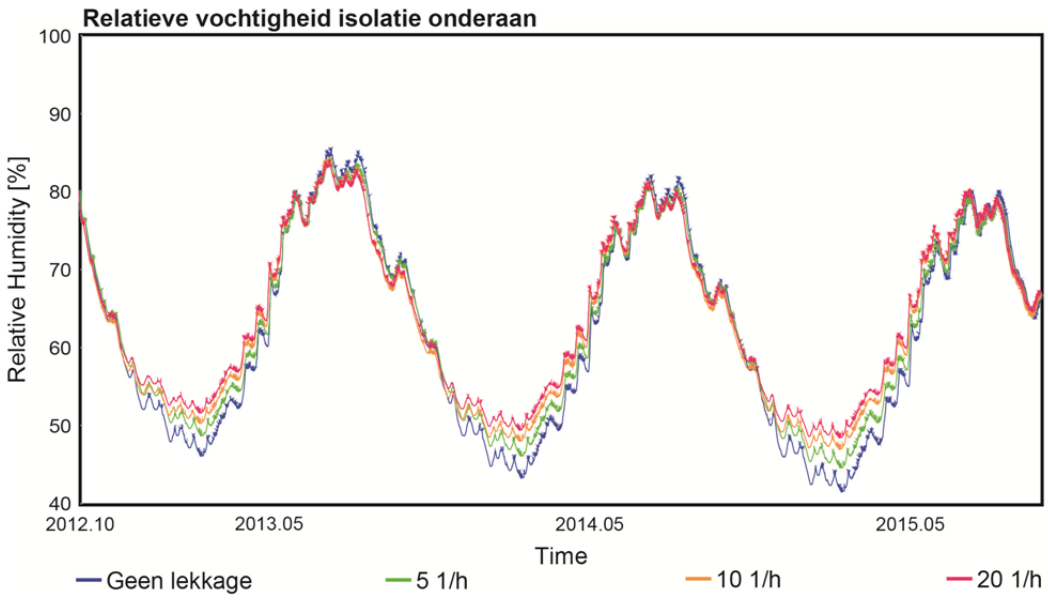
De simulaties in WUFI worden opgebouwd met een intello-dampscherm, een binnenklimaat met klimaatsklasse 3 en binnentemperatuur 20°C en een initieel vochtgehalte van 76 kg/m³ (80% RV) in de OSB-plaat.

Een eerste simulatie gaat uit van luchtcirculatie boven de isolatie, langs de onderzijde van de OSB-plaat, in contact met de buitenlucht. Hierbij wordt enkel uitgegaan van luchtventilatie, zonder extra vochttoevoeging. Dit fenomeen heeft een positief effect op de uitdroging van het dak, zelfs in de wintermaanden. Een klein luchtlek is dus niet zo erg voor het vochtgedrag in de dakopbouw. Het positieve effect van een geventileerd dak werd eerder al bekeken door Fazio & Derome [21] en Geving & Holme [25]. Het negatieve effect op de energieprestatie van het gebouw zal echter vele malen groter zijn.

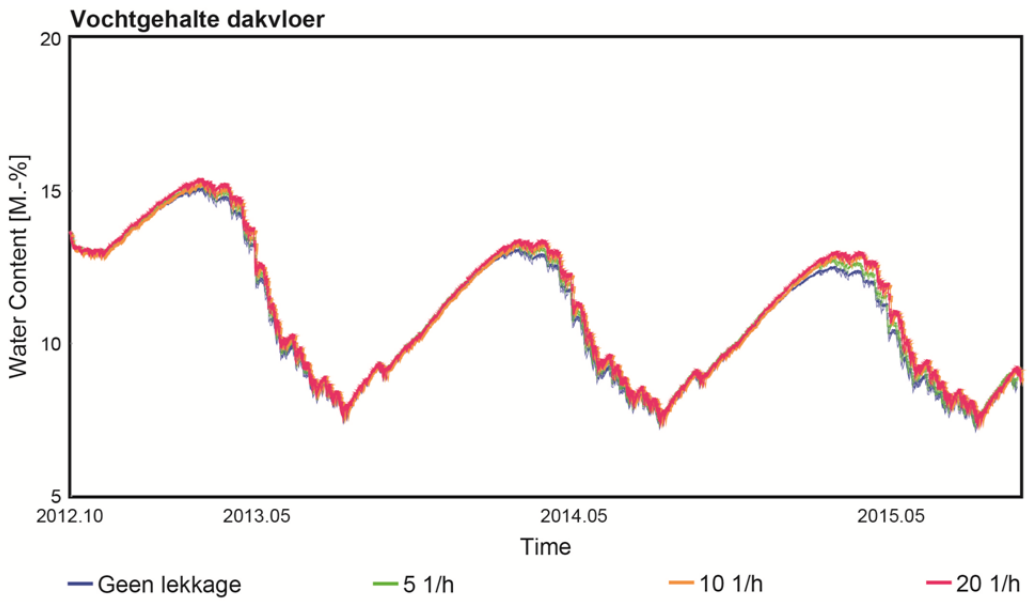


FIGUUR 109 - VERGELIJKING LEKKAGE: LUCHCIRCULATIE BOVEN: WC.

Een tweede simulatie begroot het effect van luchtcirculatie onder de isolatie, boven het dampscherm en dit door openingen in het dampscherm die in contact staan met het binnenklimaat. Dezelfde maximale relatieve vochtigheden worden bereikt in de wintermaanden, in de zomermaanden zal het vochtgehalte echter hoger blijven door de convectie, waardoor het dak minder kan uitdrogen. Het vochtgehalte in de OSB-plaat zal hierdoor oplopen, echter niet zorgwekkend.



FIGUUR 110 - VERGELIJKING LEKKAGE: LUCHCIRCULATIE ONDER: RV.



FIGUUR 111 - VERGELIJKING LEKKAGE: LUCHCIRCULATIE ONDER: WC.

CONCLUSIE

Het hygrothermisch gedrag van het compacte platte dak is afhankelijk van vele factoren, wat zorgt voor vele onzekerheden rond de veiligheid van deze dakopbouw. Het is dan ook nodig een inschatting te kunnen maken van de negatieve invloedsparameters, alvorens de toepassing in een bouwconstructie.

Het houtvochtgehalte van alle compartimeten in de testopstelling te Ronse bevindt zich onder de 20 M% na de winter (gemiddeld 16 M% zoals in de simulaties). Niets wijst hier op een risico op schade. Toch is het aangewezen de constructie voor meerdere jaren op te volgen, om een inschatting te kunnen maken van de bevochtigings- en droginscyclus. Het vochtgehalte kan namelijk doorheen de jaren verder stijgen, en na enkele jaren pas schade aanbrengen aan de dakconstructie. Dit is één van de gevaren van het compacte platte dak.

Het gebruik van een simulatieprogramma, zoals WUFI, is een goed hulpmiddel om zo'n inschatting over verschillende jaren te kunnen maken. De overeenkomst tussen metingen en simulaties is redelijk goed, al zijn sommige materiaaleigenschappen niet geweten. Deze materiaaleigenschappen dienen dan ook verder onderzocht te worden. De materialen in de dakopbouw worden aan zeer uiteenlopende omstandigheden blootgesteld. Een goede kwaliteit en uitvoering is dan ook zeer belangerijk voor de levensduur van het dak. Een slechte aansluiting, water- en luchtlekkage kunnen lokaal voor enorme spanningen zorgen in het dak en uiteindelijk tot schade leiden.

Bij een goede uitvoering is de keuze van het **dampscherm** vrij, de verschillen zijn zeer beperkt. De vochtgestuurde dampremmen zullen wel sneller uitdrogen, wat in het geval van een hoog initieel vochtgehalte voordelig is. In geen enkele opstelling was er een risico op zomercondensatie tegen het dampscherm, ook niet bij de PE-folie met een zeer hoge dampdiffusieweerstand.

Wanneer het **initieel vochtgehalte** oploopt, zien we onder normale omstandigheden dat alle varianten zeer snel uitdrogen en enkel in de eerste winter het vochtgehalte even boven de 20 M% kan uitkomen (wanneer het dak net voor de winter dichtgelegd werd). Een beperkte hoeveelheid vocht bij de bouw van het dak leidt dan ook niet direct tot schimmelontwikkeling of andere schade.

De randomstandigheden van de constructie zijn zeer bepalend voor het hygrothermisch gedrag. Het **buitenklimaat** is verschillend over heel Europa, wat dan ook tot verschillende resultaten leidt bij verschillende onderzoeken. De hoeveelheid straling op het dakoppervlak is dan ook essentieel en bepaalt mee het uitdrogingspotentieel van de constructie. Het **binnenklimaat** is verantwoordelijk voor de hoeveelheid vocht dat in de wintermaanden opgenomen zal worden. Een hoge vochtigheid in badkamer of keuken kan het vochtgehalte in de bovenliggende dakconstructie sterk doen toenemen. In combinatie met beschaduwing en lekkage kan dit doorslaggevend zijn. In normale omstandigheden zal dit echter nooit een risico op schade vormen.

De keuze van de materialen is zeer belangrijk. Uit de vergelijking van verschillende **isolatiematerialen** blijkt dat vochtbuffende materialen (cellulose- en houtvezels) voor een hoger vochtgehalte in de constructie zorgen. Minerale wol is hierdoor misschien een waardig alternatief, al is verder onderzoek hierbij nodig. Het is niet aangewezen enkel te vertrouwen op de resultaten van de simulatie, aangezien eerder onderzoek door Winter ea [90] aan de hand van een testopstelling het omgekeerde besluit. Toch kunnen de hygrische eigenschappen van de isolatie een grote invloed hebben op het globale gedrag van de constructie. Uit de metingen blijkt het vochtgehalte bij cellulose lager te zijn dan houtwol.

Voor de **dakvloer** wordt meestal gekozen voor een OSB-plaat. Andere materialen zijn hier ook mogelijk, al lijkt een houten beplanking af te raden. De hygroscopische curve van het gebruikte materiaal is hierbij doorslaggevend. Minder natuurlijke materialen, zoals een vezelcementplaat, kunnen hiervoor ook dienst doen, zeker wanneer deze minder gevoelig zijn voor schimmelgroei. Het gebruik van een vochtbufferend materiaal onder de dakvloer is ook mogelijk, waardoor het vochtgehalte in de dakvloer minder hoog oploopt. Dit

materiaal dient dan ook bestand te zijn tegen schimmelgroei, indien de vochtgehaltes hier hoog oplopen.Net als de dakvloer, zijn ook de **hellingsspieën** blootgesteld aan hoge vochtigheden. De keuze van kwalitatieve materialen, die weinig vocht opzuigen (lage hygroscopische curve) is aan te raden.

De belangrijkste factor voor de goede werking van het compacte platte dak is de zonnestraling op het dakoppervlak. **Beschaduwing** van het dak zal de mogelijke uitdroging van het dak sterk belemmeren door de beperkte stijging van de temperatuur, wat op enkele jaren tijd tot een behoorlijke schade kan leiden. Deze conclusie werd ook al getrokken uit eerdere onderzoeken, aan de hand van testopstellingen en simulaties. Groendaken en de plaatsing van zonnepanelen zijn dan ook sterk af te raden. Enkel het gebruik van een PE-folie als dampscherm komt als aanvaardbaar uit de simulaties. Wanneer de begincondities goed zijn, zal deze dakopbouw verder geen vocht accumuleren en is er geen risico op schimmelgroei.

De **lekkage** en convectie binnen een dak is moeilijk in te schatten en voor iedere constructie anders. Toch is een goede luchtdichte uitvoering belangrijk voor het hygrothermisch gedrag en de energieprestatie van het dak. Een slechte aansluiting, scheur of opening in het dampscherm kan zorgen voor een hogere vochtbelasting. In goede omstandigheden kan het dak echter een grote hoeveelheid vocht bufferen, om dan terug te laten uitdrogen in de zomer. Kleine onnauwkeurigheden leiden niet direct tot schade aan het dak. Convectie binnen het dak kan zelfs een positief effect hebben (in contact met de buitenlucht) en het dak helpen uitdrogen.

Bij een goede uitvoering en goede bezonning kan men besluiten dat er geen risico's zijn op schade en het compacte platte dak een betrouwbare constructie is. Verder onderzoek is echter nodig indien er zonnepanelen geplaatst worden of het dakoppervlak beschaduwd wordt door omliggende gebouwen en hierdoor slechts een beperkte hoeveelheid zonlicht het dak bereikt.

BIJLAGEN

BIJLAGE A: RESULTATEN PROEVEN: BEPALING HYGRISCHE EIGENSCHAPPEN

BIJLAGE B: TECHNISCHE FICHES

BIJLAGE C: METINGEN COMPACT DAK TE RONSE

BIJLAGE D: VERGELIJKING METINGEN & SIMULATIE WUFI

BIJLAGE E: RESULTATEN ONDERZOEKSCASES

BIBLIOGRAFISCHE REFERENTIES

[1] ADAN, O., On the fungal defacement of interior finishes. Dissertation, University of Technology, Eindhoven, 1994.

[2] ASHRAE., ASHRAE Standard 160P-Criteria for Moisture Control Design Analysis in Buildings, 2008.

[3] BLUDAU, C., KÜNZEL, H.M., ZIRKELBACH, D., Hygrothermal performance of flat roofs with construction moisture, ASHRAE Buildings XI, 2010.

[4] BUXBAUM, C., SEILER, A., PANKRATZ, O. Analysis and comparison of the hygrothermal performance of a "passive house" - wall systems in the climate of central Europe, Proceedings of the 10th international conference on thermal performance of the exterior envelopes of whole buildings, 2007.

[5] CARLL, C. G., HIGHLEY, T. L., Decay of Wood and Wood-Based Products Above Ground in Buildings, Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 27, No. 2 (p 150-158), 1999.

[6] CEN. EN ISO 13788: Hygrothermal performance of building components and building elements - internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - calculation methods. Brussel : CEN, 2001.

[7] CEN. EN ISO 15026: Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation, Brussel: CEN, 2007.

[8] CEN. EN ISO 15148: Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion, Brussel: CEN, 2002.

[9] CEN. EN ISO 15927: Hygrothermal performance of buildings: Calculation and presentation of climatic data. Brussel: CEN, 2005.

[10] CEN. EN ISO 12570: Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of moisture content by drying at elevated temperature, Brussel: CEN, 2000.

[11] CEN. EN ISO 12571: Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of hygroscopic sorption properties, Brussel: CEN, 2000.

[12] CEN. EN ISO 12572: Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties, Brussel: CEN, 2001.

[13] CHANG, S.C., HUTCHEON, N.B., Dependence of Water Vapor Permeability on temperature and Humidity, ASHRAE Transaction 62 (p. 437-449), 1956.

[14] DEROME, D., Moisture occurence in roof assemblies containing moisture storing insulation and its impact on the durability of building envelope, PhD. Thesis. - Department of Building, Civil and Environmental Engineering - Concordia University, 1999.

[15] DEROME,D., DERLUYN, H., ZILLIG,W.,CARMELIET, J., Model for hysteretic moisture behaviour of wood. Proceedings of the Nordic Symposium on Building Physics (p. 959-966), Kopenhagen, 2008.

[16] DE JONGHE, S., Vochttransporteigenschappen van capillaire onderdakmaterialen, Ugent, 2006.

[17] DE MEERSMAN, G. Vochtproblemen in bouwknopen: studie naar het vochtgedrag van metselwerk aan de hand van het numerieke simulatiepakket WUFI, Ugent, 2012.

[18] Deutscher Wetterdienst, Aspiration psychrometer tables, Auflage, Braunschweig, 1976.

[19] DU, Q.P., GEISSEN, A., NOACK, C., Die genauigkeit der elektrischen holzfeuchtemessung nach dem wiederstandprinzip, 1991.

[20] EYCKENS, J. Compacte houten platte daken met vochtgestuurde damprem: hygrische optimalisatie van de dakstructuur aan de hand van dynamische computersimulaties. Gent, Masterproef voor de opleiding master in de industriële wetenschappen Bouwkunde, 2011.

[21] FAZIO, P., DEROME, D. ea., Testing of flat roofs insulated with cellulose fiber, Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VII Conference, ASHRAE Special Publications (p. 3-13), 1998.

[22] FITZ, C., KRUS, M., ZILLIG, W., Untersuchungen zum Feuchteschutz von Leichtbaukonstruktionen mit Bauplatten aus Holzwerkstoffen, Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP-Report, HTB-10/2004), Holzkirchen 2004.

[23] GELDOF, P., HAYEN, R., THOELEN P., VAN DYCK B., Duurzaam zonder verduurzaming. Over duurzaam houtgebruik zonder preventieve chemische behandeling, VIBE vzw, 2005.

[24] GEVING, S., UVSLØKK, S., Moisture conditions in timber frame roofs and wall structures – Test house measurements of heat-, air and moisture transfer models, Project report 273, Norwegian Building Research institute, Trondheim, 2000.

[25] GEVING, S., HOLME, J., The drying potential and risk for mold growth in compact wood frame roofs with built-in moisture, J. of building physics, Vol. 33 (p. 249-269), 2010.

[26] HAGENTOFT, C.E., IEA Annex 24, Final report Volume 5, Task 5: Performances and Practice: The impact of heat, air, and moisture transport on energy demand and durability. Energy conservation in buildings and community systems, K.U. Leuven, 1998.

[27] HANSEN, K., Sorption isotherms: A catalogue, Technical Report 162/86,1986.

[28] HANSEN, K., RODE, C., DE PLACE HANSEN, E., PADFIELD, T., KRISTIANSEN, F., Experimental investigation of the hygrothermal performance of insulation materials, Buildings VIII, 1999.

[29] HEDLIN, C.P., Heat transfer in a wet porous thermal insulation in a flat roof, Journal of thermal insulation Vol. 11, 1988.

[30] HENS, H., Warmte- en massatransport, Leuven, 2003.

[31] HUKKA, A., VIITANEN, H., A mathematical model of mould growth on wooden material, Wood science and technology 33 (p. 475-485), 1999.

[32] IEA Annex XIV Condensation and energy: Sourcebook, Leuven, 1991.

[33] ISAKKSON, T., THELANDERSSON, S., EKSTRAND-TOBIN, A., JOHANSSON, P., Critical conditions for onset of mould growth under varying climate conditions, Building & Environment 45, 2010.

[34] ISOPROC, Studie: Berekeningen van het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade van thermische isolatie in hout- en staalbouwconstructies.

[35] IWT VLIET/930235, Deel 5: Hellende daken, 1997.

[36] JANNSENS, A. Hygrische studie koud dak met cellulose-isolatie, Ugent, 2003.

[37] JANSSENS, A., Reliable control of interstitial condensation in lightweight roof systems: calculation and assessement methods, KU Leuven, 1998.

[38] JANSSENS, A., HENS, H., Water vapour transfer properties of spunbonded plastic films, Journal of thermal insulation and building envelopes Vol. 21, 1997.

[39] KALAMEES, T., KURNITSKI, J., Moisture convection performance of external walls and roofs, Journal of building physics, 2009.

[40] KARAGIOZIS, A.N., Moisture engineering, Proceedings of the 7th conference on building science and technology – Durability of buildings (p. 93-112), Toronto, 1997.

[41] KARAGIOZIS, A.N., Advanced Numerical Models for Hygrothermal Research. In H.R. Trechsel (Ed), Moisture Analysis and Condensation Control in Building Envelopes (p. 90-106),2001.

[42] KARAGIOZIS, A.N., KÜNZEL, H. en HOLM, A., WUFI-ORNL/IBP- A north American hygrothermal model, Contribution to "Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII", 2001.

[43] KARAGIOZIS, A.N., DESJARLAIS, A., SALONVAARA, M., Sensitivity of Low Sloped Roofs Designs to Initial Water and Air Leakage. In Hot and Humid Symposium, Houston, 2002.

[44] KEHRER, M., Heat and moisture sources: Simulation and ventilation, WUFI workshop NTNU/SINTEF, 2008.

[45] KEHRER, M., Determination of Material Properties for Hygrothermal Calculation with WUFI, Fraunhofer IBP.

[46] KIM, A. K., SHAW, C. Y., Measured Air Leakage of Buildings, ASTM STP 904 (p. 17-32), 1986.

[47] KRUS, M., KÜNZEL, H.M., Determination of D_w from A-value, IEA Annex XXIV Report T1, 1993.

[48] KRUS, M., Moisture transport and storage coefficients of porous mineral building materials: theoretical principles and new test methods, Fraunhofer IRB, 1996.

[49] KRUS, M., SEDLBAUER, K., ZILLIG, W., KÜNZEL H.M., A new model for mould prediction and its application on a test roof. Cracow : Proceedings of the II international scientific conference on the current problems of building physics in the rural building, 2001.

[50] KUMARAN, M.K., Report on analytical methods to derive moisture diffusivity from transient moisture distribution, IEA Annex XXIV Report T3, 1992.

[51] KUMARAN, M.K., IEA Annex XXIV: Volume 3 Material Properties, 1996.

[52] KUMARAN, M.K., An Alternative Procedure for the Analysis of Data from the Cup Method Measurements for Determination of Water Vapor Transmission Properties. Journal of Testing and Evaluation 26(6) (p. 575 – 581), 1998.

[53] KÜNZEL, H.M., Bedeutung von Klimabedingungen und Diffusionseigenschaften für die Feuchtesicherheit voll gedämmter Altbaudächer, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1998.

[54] KÜNZEL, H.M., Flexibel vapor control solves moisture problems of building assemblies – Smart Vapor Retarder to replace the convetional PE-film, J. Thermal envelope & Building science, Vol. 23 (p. 95-102), 1999.

[55] KÜNZEL, H.M., More moisture load tolerance of construction assemblies through the application of a smart vapor retarder, ASHRAE Conference proceedings thermal Envelopes VII (p 129-132), Clearwater Beach, 1998.

[56] KÜNZEL, H.M. Simultaneous heat and moisture transport in building components - one and two dimensional calculation using simple parameters, Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 1995.

[57] KÜNZEL, H.M., Moisture risk assessment of roof constructions by computer simulation in comparison to the standard Glaser-method. Eindhoven : Proceedings of the international building physics conference: tools for design and engineering of buildings, 2000.

[58] KÜNZEL, H.M., SCHMIDT, TH., HOLM, A. Exterior surface temperature of different wall constructions - comparison of numerical simulation and experiment. Dresden : Proceedings 11th symposium for building physics (p. 441-449), 2002.

[59] KÜNZEL, H.M., ZIRCKELBACH, D., SCHAFACZEK, B., Modelling the effect of air leakage in hygrothermal envelope simulation.

[60] LAKATOS, A., Investigation of water sorption properties of different insulating materials, Debrecen, 2012.

[61] LSTIBUREK, J.W., Understanding Vapor Barriers. ASHRAE Journal 46, 2004.

[62] LSTIBUREK, J.W., CARMODY, J., Moisture control handbook: principles and practices for residential and small commercial buildings, 1993.

[63] MAHIEU, E., NOIRFALISSE, E., STESKENS, P. Compactdaken, een nieuwe trend?, WTCB-Dossiers 2012/2.6, 2012.

[64] NUSSER, B., TEIBINGER, M., BEDNAR, T., Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvolldämmung — Teil 1: Nicht belüftete Nacktdächer mit Folienabdichtung, Bauphysik Vol. 32 (p. 132–143) ,2010.

[65] NUSSER, B., TEIBINGER, M., BEDNAR, T., Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvolldämmung — Teil 2: Nicht belüftete, extensiv begrünte Dächer mit Zellulose- und Mineralwolledämmung, Bauphysik Vol. 32 (p. 219–225) ,2010.

[66] NUSSER, B., TEIBINGER, M., BEDNAR, T., Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvolldämmung — Teil 3: Hinterlüftete und nicht hinterlüftete Metalldächer, Bauphysik Vol. 32 (p.288–295), 2010.

[67] NUSSER, B., TEIBINGER, M., BEDNAR, T., Low-pitched timber roofs, World conference on timber engineering, 2010.

[68] OUSTAD, M., GUSTAVSEN, A., UVSLOKK, S., Calculation of moisture and heat transfer in compact roofs and comparison with experimental data, Proceedings of the 7th Nordic symposium on building physics Vol. 2, 2005.

[69] ROELS, S., Experimental analysis of moisture buffering, IEA Annex 41 Whole building Heat, Air, Moisture Response, 2008.

[70] ROELS, S., CARMELIET, J., Water vapour permeability and sorption isotherm of coated gypsum board. 7th symposium on Building Physics in the Nordic countries. Reykjavik, 2005.

[71] SALONVAARA, M., NIEMINEN, J., Hygrothermal performance of low-sloped roofs with groove ventilation, Proceedings of the 6th symposium on building physics in the Nordic countries (p. 239-246), Trondheim, 2002.

[72] SCHUMACHER, C., Hygrothermal performance of insulated, sloped, wood-framed roof assemblies, University of Waterloo, 2008.

[73] SEDLBAUER, K. Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components. Stuttgart, Fraunhofer IBP, 2001.

[74] SCHASCHEK, H., Movement mechanism of water vapour in porous leaf-shaped materials, 1956.

[75] SIMPSON, W., TEN WOLDE, A., Wood Handbook - Wood as an engineering material, Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, Madison, 1999.

[76] SLANINA, P., Moisture transport in compact flat roofs, Czech technical university Prague, 2009.

[77] Stad Gent, Passiefhuizen in houtskeletbouw, Gent, 2010.

[78] STRAUBE, J. Moisture control, Ontario : University of Waterloo.

[79] STRAUBE, J., ONYSKO, D., SCHUMACHER, C., Methodology and design of field experiments for monitoring the hygrothermal performance of wood frame enclosures, journal of building physics Vol. 26, 2002.

[80] SVENNBERG, K., SEGERHOLM, I., Performance of edge sealing systems used in moisture transport experiments, Research in Building Physics and Building Engineering, 2006.

[81] THEDEN,G., The drying of wood-destroying fungi in dry wood, Material und Organismen, Vol. 7, No. 1, 1973.

[82] TOBIASSON, W. General Considerations for Roofs. In H.R. Trechsel (Ed), Moisture Control in Buildings (p.35-53), Philadelphia: ASTM, 1994.

[83] VANDENBUSSCHE, E. Duurzaamheid van houten gevels en houten constructies (houtskeletbouw), Ugent, 2011.

[84] VIBE, Isolatie: duurzame jeugdwerkinfrastructuur ,2007.

[85] VIITANEN, H., RITSCHKOFF, A., Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature. Uppsala, The Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products, 1991.

[86] VIITANEN H., BJURMAN J., Mould growth on wood under fluctuating humidity conditions, 1995.

[87] VOS, B.H., Inwendige condensatie, Stichting bouwresearch, Brussel, 1968.

[88] Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf, Het platte dak. Opbouw, materialen, uitvoering, onderhoud, Brussel, WTCB, Technische Voorlichting, nr 215, 2000.

[89] WINTER, S., FÜLLE, C., WERTHER, N., Experimentelle und numerische Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens von flach geneigten Dächern in Holzbauweise mit oberer dampfdichter Abdichtung unter Einsatz ökologischer Bauprodukte zum Erreichen schadensfreier, markt- und zukunftsgerechter Konstruktionen, Fraunhofer IRB Verlag, 2009.

[90] WINTER, S., FÜLLE, C., WERTHER, N., SIEDER, M., Experimental and numerical study on the hygrothermal behavior of nonventilated wooden flat roof constructions with ecological building products, World conference on timber engineering, 2010.

[91] ZIRCKELBACH, D., KÜNZEL, H.M., SCHAFACZEK, B., Vapour control design of wooden structures including moisture sources due to air exfiltration, NSB, 2011.

Bijlage A

Resultaten proeven: Bepaling hygrische eigenschappen

Sorptieproef

NBN ISO EN 12571

Bepaling van de thermische sorptie-eigenschappen

Bepaling 1:
RV= 75,13 ± 0,13
Zout= NaCl (bij 23°C)

Bepaling 2:
RV= 84,65 ± 0,27
Zout= KCl (bij 23°C)

Bepaling 3:
RV= 94,00 ± 0,60
Zout= KNO_3 (bij 23°C)

		Weging 0 (g) totaal	Weging 0 (g) specimen	Dichtheid (kg/m³)	Weging 1 (g) totaal	Weging 1 (g) specimen	Vochtgehalte u (%)	Vochtgehalte (kg/m³)	Weging 2 (g) totaal	Weging 2 (g) specimen	Vochtgehalte u (%)	Vochtgehalte (kg/m³)	Weging 3 (g) totaal	Weging 3 (g) specimen	Vochtgehalte u (%)	Vochtgehalte (kg/m³)
OSB	1.		47,35	561,19		53,55	13,09	73,48		55,61	17,44	97,90		56,83	20,02	112,36
	2.		48,08	569,84		54,24	12,81	73,01		56,35	17,20	98,01		57,59	19,78	112,71
	3.		50,67	600,53		56,80	12,10	72,65		58,94	16,32	98,01		60,32	19,04	114,37
	4.		45,12	534,76		50,78	12,54	67,08		52,62	16,62	88,89		53,61	18,82	100,62
				566,58			**12,64**	**71,56**			**16,90**	**95,70**			**19,42**	**110,01**
						Δu =	**0,02**			Δu =	**0,02**			Δu =	**0,02**	
HW	1.	8,53														
		13,55	5,02	40,16	14,25	5,72	13,94	5,60	14,69	6,16	22,71	9,12	15,21	6,68	33,07	13,28
	2.	8,55														
		13,55	5,00	40	14,25	5,70	14,00	5,60	14,71	6,16	23,20	9,28	15,24	6,69	33,80	13,52
	3.	8,53														
		13,55	5,02	40,16	14,20	5,67	12,95	5,20	14,64	6,11	21,71	8,72	15,16	6,63	32,07	12,88
				40,11			**13,63**	**5,47**			**22,54**	**9,04**			**32,98**	**13,23**
						Δu =	**0,02**			Δu =	**0,02**			Δu =	**0,02**	
CE	1.	8,46														
		13,50	5,04	40,32	14,08	5,62	11,51	4,64	14,27	5,81	15,28	6,16	14,46	6,00	19,05	7,68
	2.	8,36														
		13,45	5,09	40,72	14,04	5,68	11,59	4,72	14,22	5,86	15,13	6,16	14,40	6,04	18,66	7,60
	3.	8,38														
		13,38	5,00	40	13,90	5,52	10,40	4,16	14,08	5,70	14,00	5,60	14,34	5,96	19,20	7,68
				40,35			**11,17**	**4,51**			**14,80**	**5,97**			**18,97**	**7,65**
						Δu =	**0,02**			Δu =	**0,02**			Δu =	**0,02**	

Dampdiffusieproef

NBN ISO EN 12572

Bepaling van de waterdampdoorlatendheidseigenschappen

Cellulose

A = 0,01 m²

d = 0,1 m

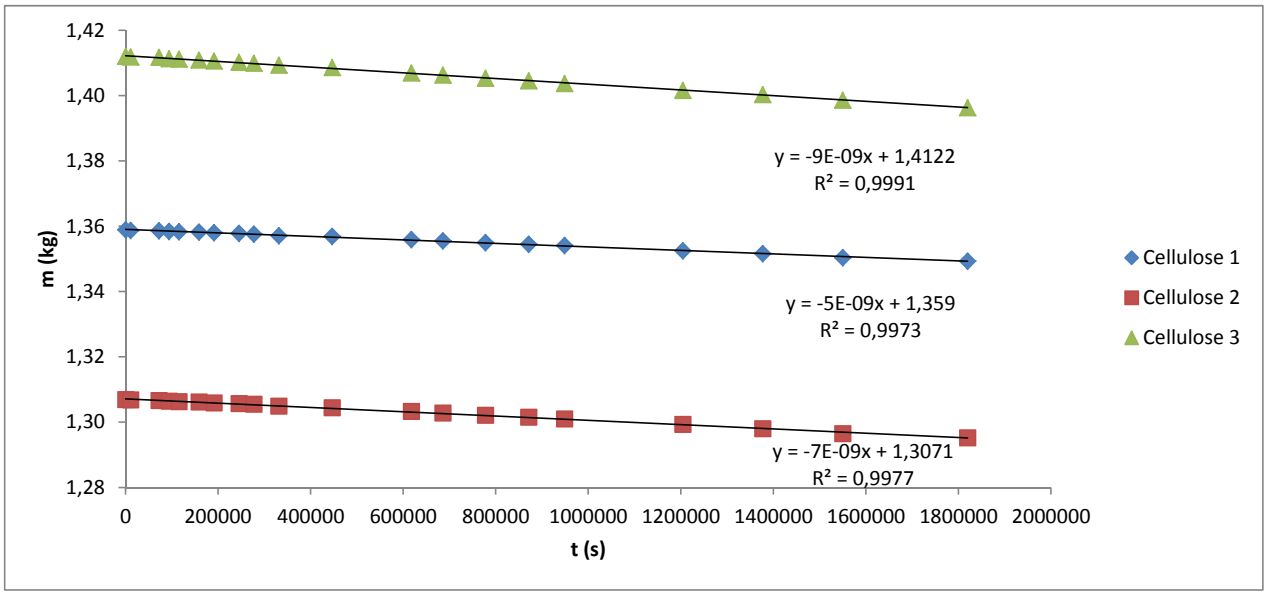
θ = 23 °C

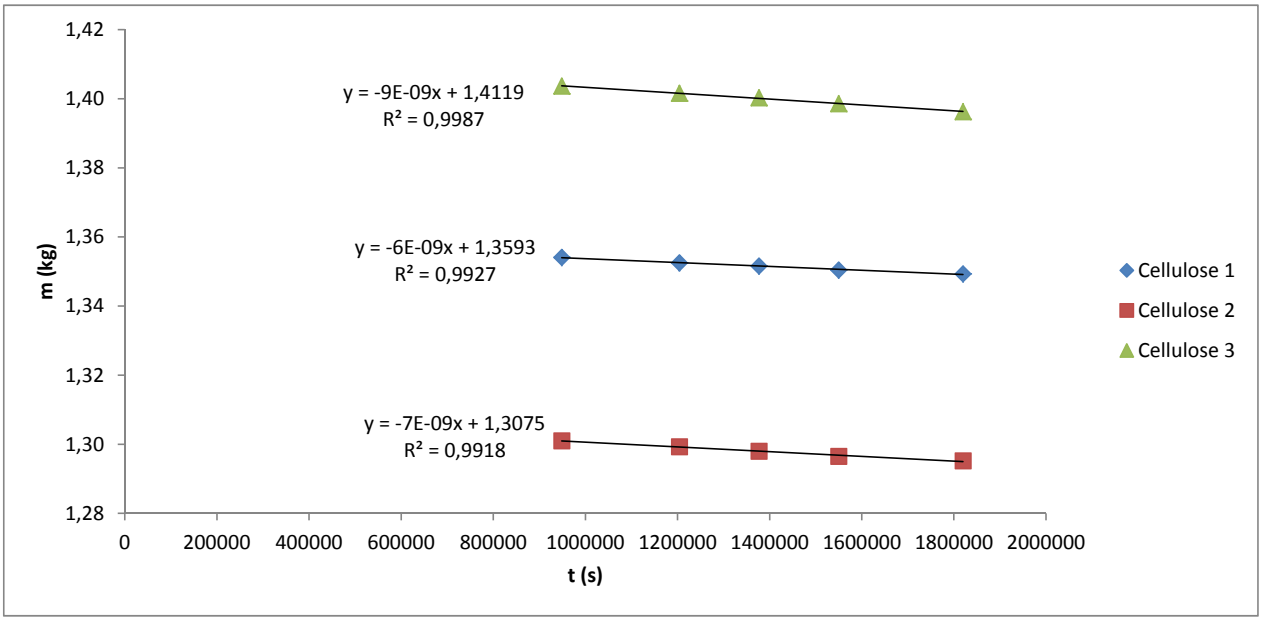
ϕ = 58 %

			CE 1			CE 2			CE 3		
			75 %			85 %			95 %		
Metingen	t (s)	Δt (s)	m (kg)	Δm (kg)	Δm_{12} (kg/s)	m (kg)	Δm (kg)	Δm_{12} (kg/s)	m (kg)	Δm (kg)	Δm_{12} (kg/s)
1	0		1,3589			1,3069			1,4120		
2	10800	10800	1,3587	-2,0E-04	-1,9E-08	1,3068	-1,0E-04	-9,3E-09	1,4118	-2,0E-04	-1,9E-08
3	72000	61200	1,3586	-1,0E-04	-1,6E-09	1,3066	-2,0E-04	-3,3E-09	1,4117	-1,0E-04	-1,6E-09
4	93600	21600	1,3584	-2,0E-04	-9,3E-09	1,3064	-2,0E-04	-9,3E-09	1,4113	-4,0E-04	-1,9E-08
5	115200	21600	1,3583	-1,0E-04	-4,6E-09	1,3063	-1,0E-04	-4,6E-09	1,4112	-1,0E-04	-4,6E-09
6	158400	43200	1,3582	-1,0E-04	-2,3E-09	1,3062	-1,0E-04	-2,3E-09	1,4109	-3,0E-04	-6,9E-09
7	190800	32400	1,3580	-2,0E-04	-6,2E-09	1,3059	-3,0E-04	-9,3E-09	1,4106	-3,0E-04	-9,3E-09
8	244800	54000	1,3578	-2,0E-04	-3,7E-09	1,3057	-2,0E-04	-3,7E-09	1,4102	-4,0E-04	-7,4E-09
9	277200	32400	1,3576	-2,0E-04	-6,2E-09	1,3055	-2,0E-04	-6,2E-09	1,4099	-3,0E-04	-9,3E-09
10	331200	54000	1,3571	-5,0E-04	-9,3E-09	1,3049	-6,0E-04	-1,1E-08	1,4093	-6,0E-04	-1,1E-08
11	446400	115200	1,3569	-2,0E-04	-1,7E-09	1,3044	-5,0E-04	-4,3E-09	1,4086	-7,0E-04	-6,1E-09
12	617400	171000	1,3559	-1,0E-03	-5,8E-09	1,3033	-1,1E-03	-6,4E-09	1,4069	-1,7E-03	-9,9E-09
13	685800	68400	1,3555	-4,0E-04	-5,8E-09	1,3028	-5,0E-04	-7,3E-09	1,4063	-6,0E-04	-8,8E-09
14	777600	91800	1,3550	-5,0E-04	-5,4E-09	1,3021	-7,0E-04	-7,6E-09	1,4053	-1,0E-03	-1,1E-08
15	871200	93600	1,3545	-5,0E-04	-5,3E-09	1,3015	-6,0E-04	-6,4E-09	1,4045	-8,0E-04	-8,5E-09
16	948600	77400	1,3541	-4,0E-04	-5,2E-09	1,3010	-5,0E-04	-6,5E-09	1,4037	-8,0E-04	-1,0E-08
17	1204200	255600	1,3525	-1,6E-03	-6,3E-09	1,2993	-1,7E-03	-6,7E-09	1,4016	-2,1E-03	-8,2E-09
18	1377000	172800	1,3516	-9,0E-04	-5,2E-09	1,2980	-1,3E-03	-7,5E-09	1,4003	-1,3E-03	-7,5E-09
19	1549800	172800	1,3504	-1,2E-03	-6,9E-09	1,2965	-1,5E-03	-8,7E-09	1,3986	-1,7E-03	-9,8E-09
20	1819800	270000	1,3493	-1,1E-03	-4,1E-09	1,2952	-1,3E-03	-4,8E-09	1,3963	-2,3E-03	-8,5E-09

			G=	-5,0E-09	kg/s	G=	-7,0E-09	kg/s	G=	-9,0E-09	kg/s
			g_v=	-5,0E-07	kg/s.m²	g_v=	-7,0E-07	kg/s.m²	g_v=	-9,0E-07	kg/s.m²
p_{omg} =	1628,53	Pa	p_{v1} =	2105,86	Pa	p_{v2} =	2386,64	Pa	p_{v3} =	2667,42	Pa
			Δp_v =	477,33	Pa	Δp_v =	758,11	Pa	Δp_v =	1038,89	Pa
δ_a =	2,00E-10		W =	1,0E-09	(kg/m².s.Pa)	W =	9,2E-10	(kg/m².s.Pa)	W =	8,7E-10	(kg/m².s.Pa)
			W_c=	9,26E-10		W_c=	8,28E-10		W_c=	7,82E-10	

μ =	2,16		μ =	2,42		μ =	2,56	
Sd =	0,22	m	Sd =	0,24	m	Sd =	0,26	m
ε =	10	%	ε =	9	%	ε =	9	%


1,42
1,40
1,38
1,36
1,34
1,32
1,30
1,28
m (kg)
0
200000
400000
600000
800000
1000000
1200000
1400000
1600000
1800000
2000000
t (s)
y = -9E-09x + 1,4122
R² = 0,9991
y = -5E-09x + 1,359
R² = 0,9973
y = -7E-09x + 1,3071
R² = 0,9977
Cellulose 1
Cellulose 2
Cellulose 3


1,42
1,40
1,38
1,36
1,34
1,32
1,30
1,28
m (kg)
0
200000
400000
600000
800000
1000000
1200000
1400000
1600000
1800000
2000000
t (s)
y = -9E-09x + 1,4119
R² = 0,9987
y = -6E-09x + 1,3593
R² = 0,9927
y = -7E-09x + 1,3075
R² = 0,9918
Cellulose 1
Cellulose 2
Cellulose 3

Dampdiffusieproef

NBN ISO EN 12572

Bepaling van de waterdampdoorlatendheidseigenschappen

Houtwol

A = 0,01 m²

d = 0,1 m

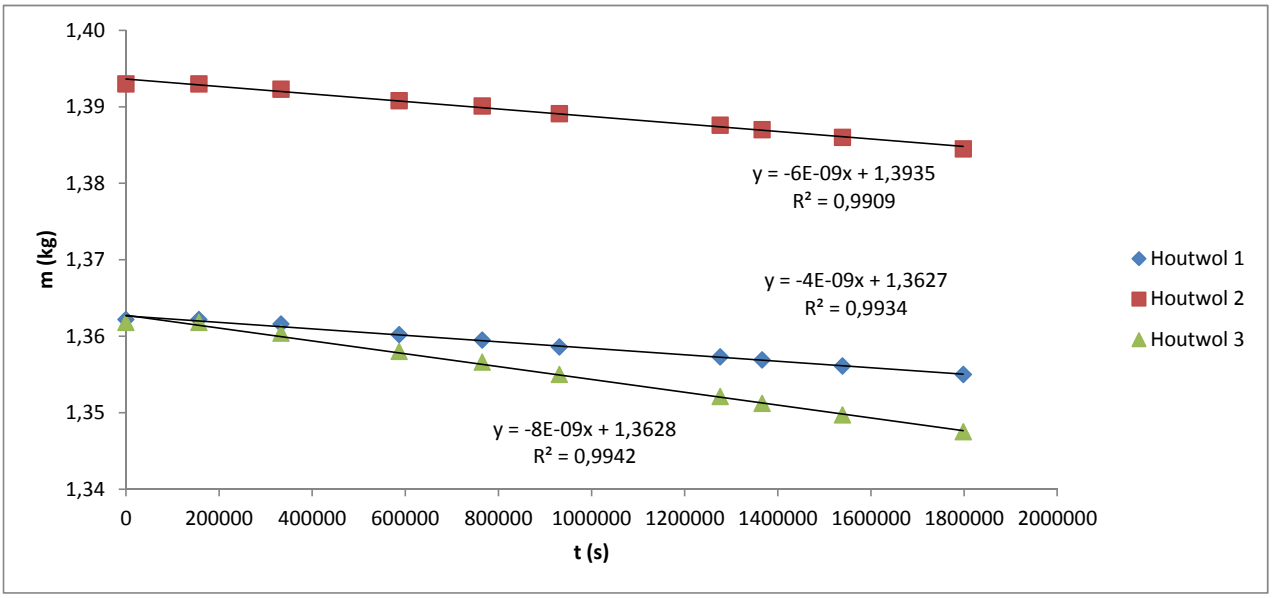
θ = 23 °C

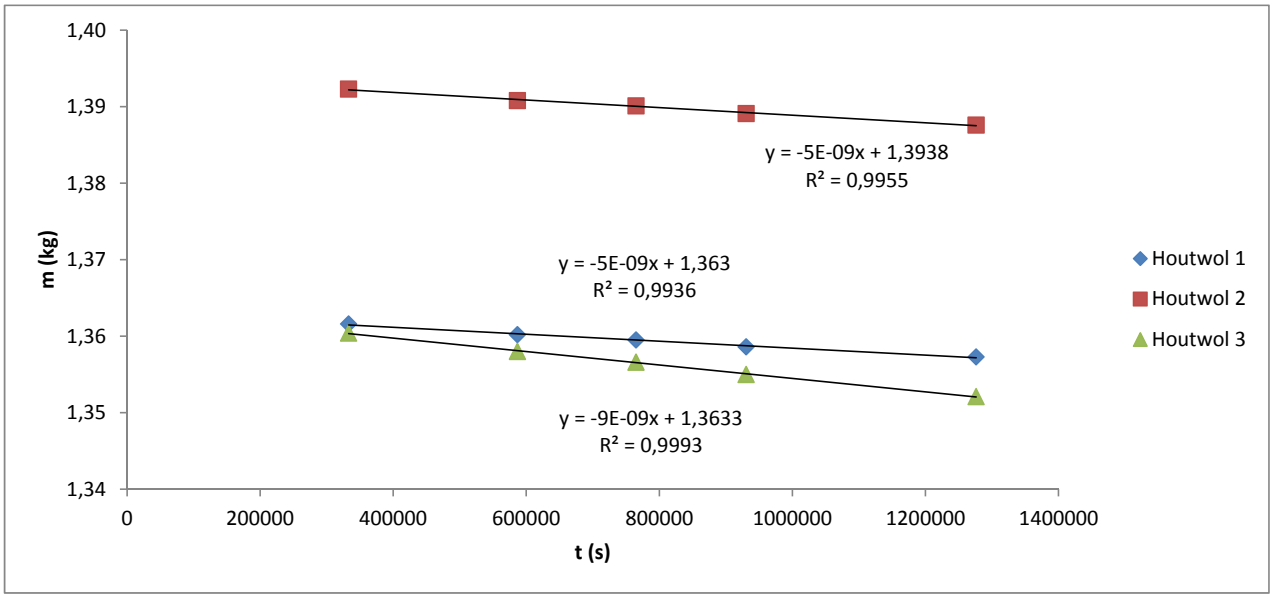
ϕ = 58 %

			HW 1			HW 2			HW 3		
			75 %			85 %			95 %		
Metingen	t (s)	Δt (s)	m (kg)	Δm (kg)	Δm_{12} (kg/s)	m (kg)	Δm (kg)	Δm_{12} (kg/s)	m (kg)	Δm (kg)	Δm_{12} (kg/s)
1	0		1,3622			1,3930			1,3618		
2	156600	156600	1,3622	0,0E+00	0,0E+00	1,3930	0,0E+00	0,0E+00	1,3618	0,0E+00	0,0E+00
3	333000	176400	1,3616	-6,0E-04	-3,4E-09	1,3923	-7,0E-04	-4,0E-09	1,3604	-1,4E-03	-7,9E-09
4	586800	253800	1,3602	-1,4E-03	-5,5E-09	1,3908	-1,5E-03	-5,9E-09	1,3580	-2,4E-03	-9,5E-09
5	765000	178200	1,3595	-7,0E-04	-3,9E-09	1,3901	-7,0E-04	-3,9E-09	1,3566	-1,4E-03	-7,9E-09
6	930600	165600	1,3586	-9,0E-04	-5,4E-09	1,3891	-1,0E-03	-6,0E-09	1,3550	-1,6E-03	-9,7E-09
7	1276200	345600	1,3573	-1,3E-03	-3,8E-09	1,3876	-1,5E-03	-4,3E-09	1,3521	-2,9E-03	-8,4E-09
8	1366200	90000	1,3569	-4,0E-04	-4,4E-09	1,3870	-6,0E-04	-6,7E-09	1,3512	-9,0E-04	-1,0E-08
9	1539000	172800	1,3561	-8,0E-04	-4,6E-09	1,3860	-1,0E-03	-5,8E-09	1,3497	-1,5E-03	-8,7E-09
10	1798200	259200	1,3550	-1,1E-03	-4,2E-09	1,3845	-1,5E-03	-5,8E-09	1,3475	-2,2E-03	-8,5E-09

			G=	-4,0E-09	kg/s	G=	-6,0E-09	kg/s	G=	-8,0E-09	kg/s
			g_v=	-4,0E-07	kg/s.m²	g_v=	-6,0E-07	kg/s.m²	g_v=	-8,0E-07	kg/s.m²
p_{omg} =	1628,53	Pa	p_{v1} =	2105,86	Pa	p_{v2} =	2386,64	Pa	p_{v3} =	2667,42	Pa
			Δp_v =	477,33	Pa	Δp_v =	758,11	Pa	Δp_v =	1038,89	Pa
δ_a =	2,00E-10		W =	8,4E-10	(kg/m².s.Pa)	W =	7,9E-10	(kg/m².s.Pa)	W =	7,7E-10	(kg/m².s.Pa)
			W_c=	7,59E-10		W_c=	7,20E-10		W_c=	7,02E-10	

μ =	2,64		μ =	2,78		μ =	2,85	
Sd =	0,26	m	Sd =	0,28	m	Sd =	0,28	m
ε =	9	%	ε =	9	%	ε =	9	%


1,40
1,39
1,38
1,37
1,36
1,35
1,34
m (kg)
0
200000
400000
600000
800000
1000000
1200000
1400000
1600000
1800000
2000000
t (s)
y = -6E-09x + 1,3935
R² = 0,9909
y = -4E-09x + 1,3627
R² = 0,9934
y = -8E-09x + 1,3628
R² = 0,9942
Houtwol 1
Houtwol 2
Houtwol 3


1,40
1,39
1,38
1,37
1,36
1,35
1,34
m (kg)
0
200000
400000
600000
800000
1000000
1200000
1400000
t (s)
y = -5E-09x + 1,3938
R² = 0,9955
y = -5E-09x + 1,363
R² = 0,9936
y = -9E-09x + 1,3633
R² = 0,9993
Houtwol 1
Houtwol 2
Houtwol 3

Dampdiffusieproef

NBN ISO EN 12572

Bepaling van de waterdampdoorlatendheidseigenschappen

OSB-plaat

A = 0,01 m²

d = 0,015 m

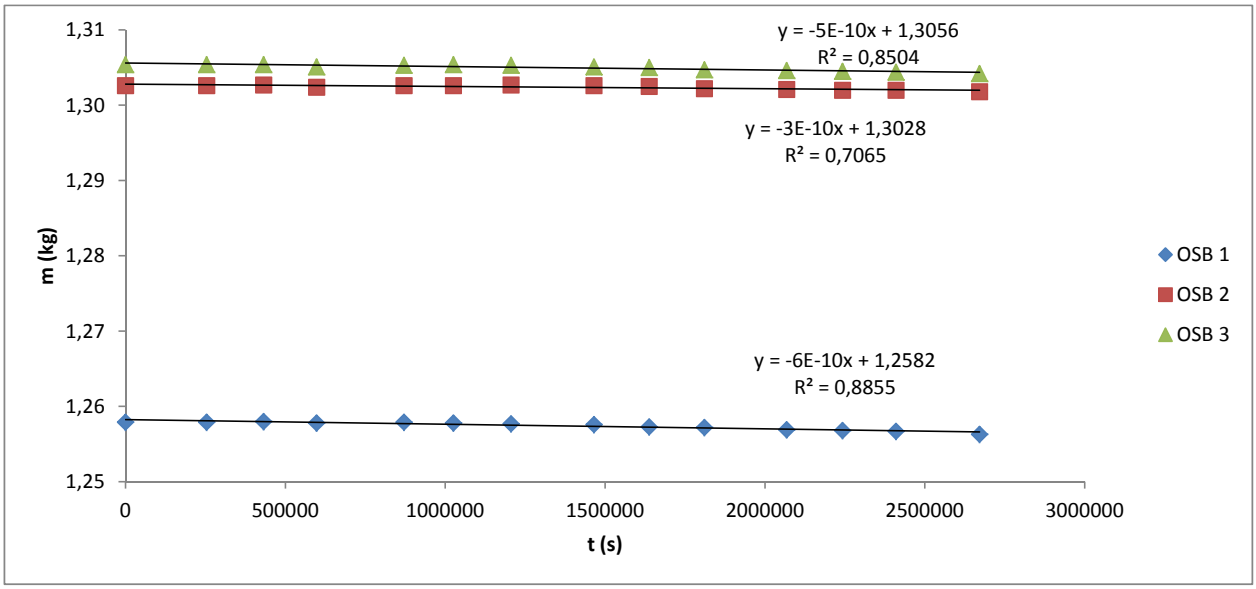
θ = 23 °C

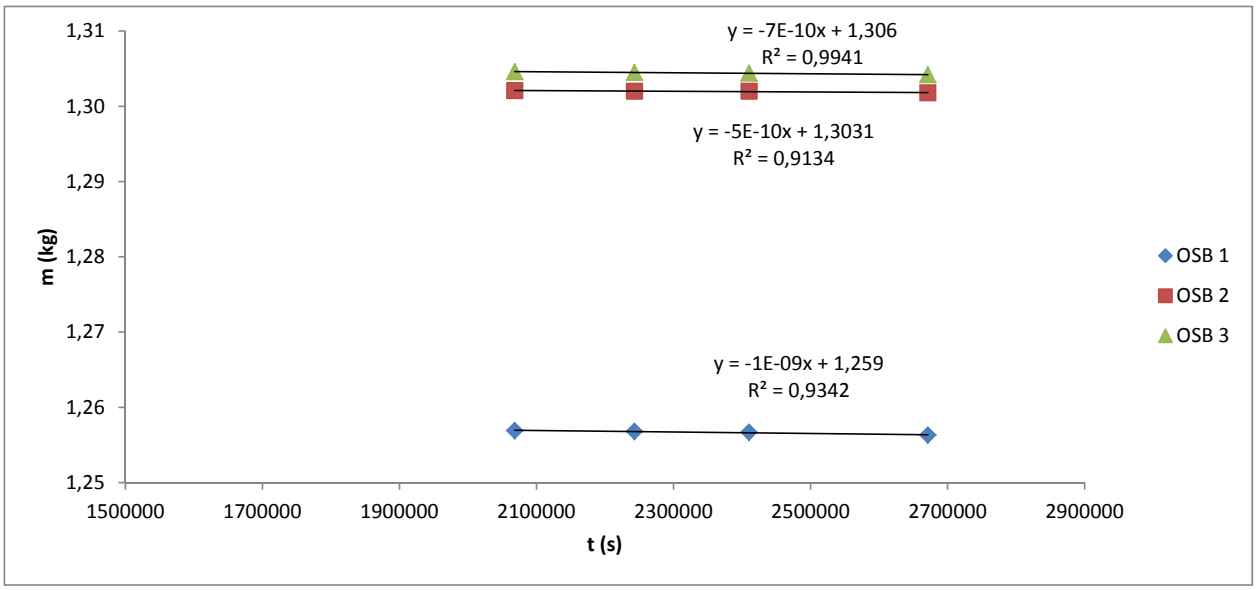
ϕ = 58 %

	OSB 1				0SB 2				OSB 3		
	75 %				85 %				95 %		
Metingen	t (s)	Δt (s)	m (kg)	Δm (kg)	Δm12 (kg/s)	m (kg)	Δm (kg)	Δm12 (kg/s)	m (kg)	Δm (kg)	Δm12 (kg/s)
1	0		1,2579			1,3026			1,3054		
2	253800	253800	1,2579	0,0E+00	0,0E+00	1,3026	0,0E+00	0,0E+00	1,3054	0,0E+00	0,0E+00
3	432000	178200	1,2580	1,0E-04	5,6E-10	1,3027	1,0E-04	5,6E-10	1,3054	0,0E+00	0,0E+00
4	597600	165600	1,2578	-2,0E-04	-1,2E-09	1,3024	-3,0E-04	-1,8E-09	1,3051	-3,0E-04	-1,8E-09
5	871200	273600	1,2579	1,0E-04	3,7E-10	1,3026	2,0E-04	7,3E-10	1,3053	2,0E-04	7,3E-10
6	1026000	154800	1,2578	-1,0E-04	-6,5E-10	1,3026	0,0E+00	0,0E+00	1,3054	1,0E-04	6,5E-10
7	1206000	180000	1,2577	-1,0E-04	-5,6E-10	1,3027	1,0E-04	5,6E-10	1,3053	-1,0E-04	-5,6E-10
8	1465200	259200	1,2576	-1,0E-04	-3,9E-10	1,3026	-1,0E-04	-3,9E-10	1,3051	-2,0E-04	-7,7E-10
9	1638000	172800	1,2573	-3,0E-04	-1,7E-09	1,3025	-1,0E-04	-5,8E-10	1,3050	-1,0E-04	-5,8E-10
10	1810800	172800	1,2572	-1,0E-04	-5,8E-10	1,3022	-3,0E-04	-1,7E-09	1,3047	-3,0E-04	-1,7E-09
11	2068200	257400	1,2569	-3,0E-04	-1,2E-09	1,3021	-1,0E-04	-3,9E-10	1,3046	-1,0E-04	-3,9E-10
12	2242800	174600	1,2568	-1,0E-04	-5,7E-10	1,3020	-1,0E-04	-5,7E-10	1,3045	-1,0E-04	-5,7E-10
13	2410200	167400	1,2567	-1,0E-04	-6,0E-10	1,3020	0,0E+00	0,0E+00	1,3044	-1,0E-04	-6,0E-10
14	2671200	261000	1,2563	-4,0E-04	-1,5E-09	1,3018	-2,0E-04	-7,7E-10	1,3042	-2,0E-04	-7,7E-10

		G=	-6,0E-10 kg/s	G=	-5,0E-10 kg/s	G=	-7,0E-10 kg/s
x=	1,156	g_v=	-6,0E-08 kg/s.m²	g_v=	-5,0E-08 kg/s.m²	g_v=	-7,0E-08 kg/s.m²
		g_{cor}=	-5,2E-08	g_{cor}=	-4,3E-08	g_{cor}=	-6,1E-08
p_{omg} =	1628,53 Pa	p_{v1} =	2105,86 Pa	p_{v2} =	2386,64 Pa	p_{v3} =	2667,42 Pa
		Δp_v =	477,33 Pa	Δp_v =	758,11 Pa	Δp_v =	1038,89 Pa
δ_a =	2,00E-10	W =	1,1E-10 (kg/m².s.Pa)	W =	5,7E-11 (kg/m².s.Pa)	W =	5,8E-11 (kg/m².s.Pa)

μ =	122,62		μ =	233,70		μ =	228,75
Sd =	1,84	m	Sd =	3,51	m	Sd =	3,43 m
ε =	9 %		ε =	9 %		ε =	9 %


y = -5E-10x + 1,3056
R² = 0,8504
y = -3E-10x + 1,3028
R² = 0,7065
y = -6E-10x + 1,2582
R² = 0,8855
m (kg)
t (s)
OSB 1
OSB 2
OSB 3
1,31
1,30
1,29
1,28
1,27
1,26
1,25
0
500000
1000000
1500000
2000000
2500000
3000000


y = -7E-10x + 1,306
R² = 0,9941
y = -5E-10x + 1,3031
R² = 0,9134
y = -1E-09x + 1,259
R² = 0,9342
m (kg)
t (s)
OSB 1
OSB 2
OSB 3
1,31
1,30
1,29
1,28
1,27
1,26
1,25
1500000
1700000
1900000
2100000
2300000
2500000
2700000
2900000

Dampdiffusieproef

NBN ISO EN 12572

Bepaling van de waterdampdoorlatendheidseigenschappen

PE-folie

A = 0,004072 m²

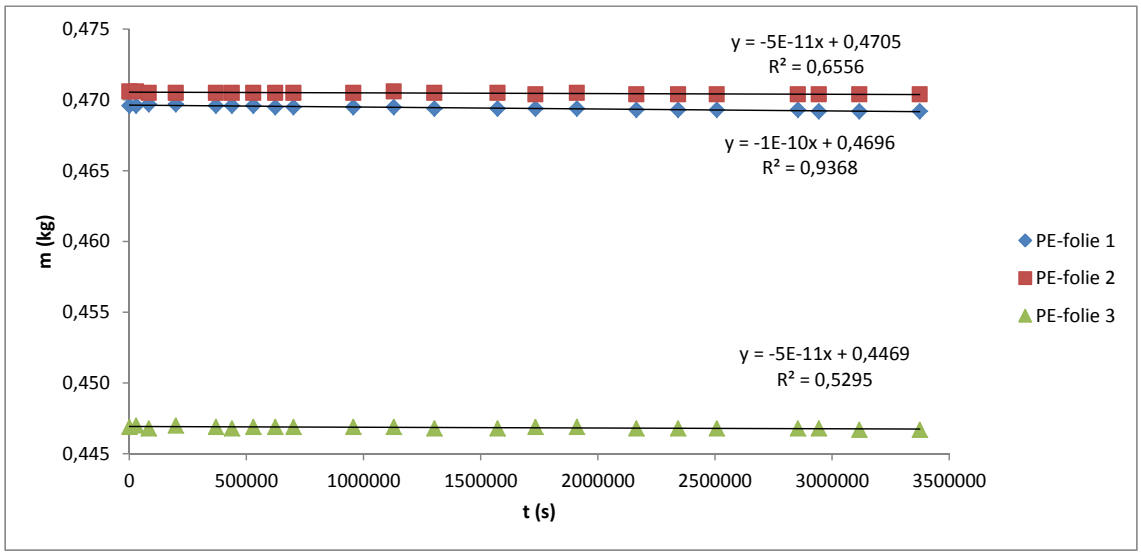
d = 0,00015 m

θ = 23 °C

ϕ = 58 %

			PE 1			PE 2			PE 3		
			75 %			85 %			95 %		
Metingen	t (s)	Δt (s)	m (kg)	Δm (kg)	Δm_{12} (kg/s)	m (kg)	Δm (kg)	Δm_{12} (kg/s)	m (kg)	Δm (kg)	Δm_{12} (kg/s)
1	0		0,4696			0,4706			0,4469		
2	28800	28800	0,4696	0,0E+00	0,0E+00	0,4706	0,0E+00	0,0E+00	0,4470	1,0E-04	3,5E-09
3	82800	54000	0,4697	1,0E-04	1,9E-09	0,4705	-1,0E-04	-1,9E-09	0,4468	-2,0E-04	-3,7E-09
4	198000	115200	0,4697	0,0E+00	0,0E+00	0,4705	0,0E+00	0,0E+00	0,4470	2,0E-04	1,7E-09
5	369000	171000	0,4696	-1,0E-04	-5,8E-10	0,4705	0,0E+00	0,0E+00	0,4469	-1,0E-04	-5,8E-10
6	437400	68400	0,4696	0,0E+00	0,0E+00	0,4705	0,0E+00	0,0E+00	0,4468	-1,0E-04	-1,5E-09
7	529200	91800	0,4696	0,0E+00	0,0E+00	0,4705	0,0E+00	0,0E+00	0,4469	1,0E-04	1,1E-09
8	622800	93600	0,4695	-1,0E-04	-1,1E-09	0,4705	0,0E+00	0,0E+00	0,4469	0,0E+00	0,0E+00
9	700200	77400	0,4695	0,0E+00	0,0E+00	0,4705	0,0E+00	0,0E+00	0,4469	0,0E+00	0,0E+00
10	955800	255600	0,4695	0,0E+00	0,0E+00	0,4705	0,0E+00	0,0E+00	0,4469	0,0E+00	0,0E+00
11	1128600	172800	0,4695	0,0E+00	0,0E+00	0,4706	1,0E-04	5,8E-10	0,4469	0,0E+00	0,0E+00
12	1301400	172800	0,4694	-1,0E-04	-5,8E-10	0,4705	-1,0E-04	-5,8E-10	0,4468	-1,0E-04	-5,8E-10
13	1571400	270000	0,4694	0,0E+00	0,0E+00	0,4705	0,0E+00	0,0E+00	0,4468	0,0E+00	0,0E+00
14	1733400	162000	0,4694	0,0E+00	0,0E+00	0,4704	-1,0E-04	-6,2E-10	0,4469	1,0E-04	6,2E-10
15	1909800	176400	0,4694	0,0E+00	0,0E+00	0,4705	1,0E-04	5,7E-10	0,4469	0,0E+00	0,0E+00
16	2163600	253800	0,4693	-1,0E-04	-3,9E-10	0,4704	-1,0E-04	-3,9E-10	0,4468	-1,0E-04	-3,9E-10
17	2341800	178200	0,4693	0,0E+00	0,0E+00	0,4704	0,0E+00	0,0E+00	0,4468	0,0E+00	0,0E+00
18	2507400	165600	0,4693	0,0E+00	0,0E+00	0,4704	0,0E+00	0,0E+00	0,4468	0,0E+00	0,0E+00
19	2853000	345600	0,4693	0,0E+00	0,0E+00	0,4704	0,0E+00	0,0E+00	0,4468	0,0E+00	0,0E+00
20	2943000	90000	0,4692	-1,0E-04	-1,1E-09	0,4704	0,0E+00	0,0E+00	0,4468	0,0E+00	0,0E+00
21	3115800	172800	0,4692	0,0E+00	0,0E+00	0,4704	0,0E+00	0,0E+00	0,4467	-1,0E-04	-5,8E-10
22	3373200	257400	0,4692	0,0E+00	0,0E+00	0,4704	0,0E+00	0,0E+00	0,4467	0,0E+00	0,0E+00
23	3551400	178200	0,4692	0,0E+00	0,0E+00	0,4704	0,0E+00	0,0E+00	0,4467	0,0E+00	0,0E+00
24	3717000	165600	0,4692	0,0E+00	0,0E+00	0,4704	0,0E+00	0,0E+00	0,4467	0,0E+00	0,0E+00
25	3990600	273600	0,4692	0,0E+00	0,0E+00	0,4704	0,0E+00	0,0E+00	0,4467	0,0E+00	0,0E+00
26	4145400	154800	0,4692	0,0E+00	0,0E+00	0,4704	0,0E+00	0,0E+00	0,4467	0,0E+00	0,0E+00
27	4325400	180000	0,4692	0,0E+00	0,0E+00	0,4704	0,0E+00	0,0E+00	0,4467	0,0E+00	0,0E+00
28	4584600	259200	0,4692	0,0E+00	0,0E+00	0,4704	0,0E+00	0,0E+00	0,4467	0,0E+00	0,0E+00
29	4757400	172800	0,4691	-1,0E-04	-5,8E-10	0,4704	0,0E+00	0,0E+00	0,4467	0,0E+00	0,0E+00
30	4930200	172800	0,4691	0,0E+00	0,0E+00	0,4704	0,0E+00	0,0E+00	0,4467	0,0E+00	0,0E+00

			G=	-1,0E-10	kg/s	G=	-5,0E-11	kg/s	G=	-5,0E-11	kg/s
			g_v=	-2,5E-08	kg/s.m²	g_v=	-1,2E-08	kg/s.m²	g_v=	-1,2E-08	kg/s.m²
p_{omg} =	1628,53	Pa	p_{v1} =	2105,86	Pa	p_{v2} =	2386,64	Pa	p_{v3} =	2667,42	Pa
			Δp_v =	477,33	Pa	Δp_v =	758,11	Pa	Δp_v =	1038,89	Pa
δ_a =	2,00E-10		W =	5,1E-11	(kg/m².s.Pa)	W =	1,6E-11	(kg/m².s.Pa)	W =	1,2E-11	(kg/m².s.Pa)
			μ =	25912,5		μ =	82310,4		μ =	112795,70	
			Sd =	3,89	m	Sd =	12,35	m	Sd =	16,92	m
			ε =	9	%	ε =	9	%	ε =	9	%


0,475
0,470
0,465
0,460
0,455
0,450
0,445
m (kg)
0
500000
1000000
1500000
2000000
2500000
3000000
3500000
t (s)
y = -5E-11x + 0,4705
R² = 0,6556
y = -1E-10x + 0,4696
R² = 0,9368
y = -5E-11x + 0,4469
R² = 0,5295
PE-folie 1
PE-folie 2
PE-folie 3

Capillariteitsproef

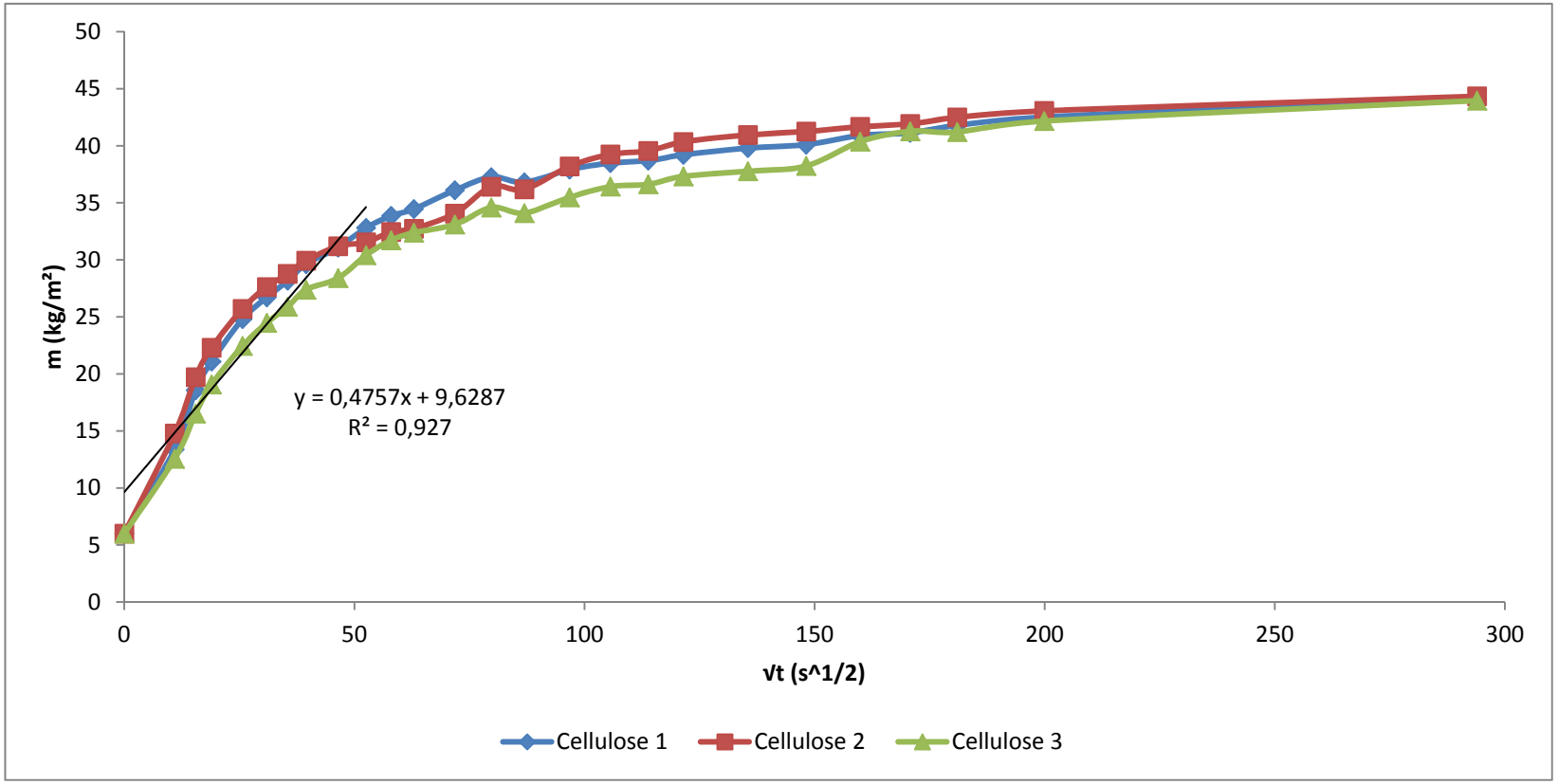
NBN EN ISO 15148

Bepaling van de waterabsorptie door gedeeltelijke onderdompeling

Cellulose

			CE 1			CE 2			CE 3			
A=	0,01	m²	Mo=	332,5	g	Mo=	331,5	g	Mo=	330,0	g	
Metingen	t (s)	√t (s^1/2)	Mtot(g)	Miso(g)	m(kg/m²)	Mtot(g)	Miso(g)	m(kg/m²)	Mtot(g)	Miso(g)	m(kg/m²)	m_{gem}
1	0	0,00	392,5	60,0	6,00	391,5	60,0	6,00	390,0	60,0	6,00	6,00
2	120	10,95	466,3	133,8	13,38	479,3	147,8	14,78	455,5	125,5	12,55	13,57
3	240	15,49	518,2	185,7	18,57	528,6	197,1	19,71	495,2	165,2	16,52	18,27
4	360	18,97	543,3	210,8	21,08	554,4	222,9	22,29	520,7	190,7	19,07	20,81
5	660	25,69	580,6	248,1	24,81	588,5	257,0	25,70	554,5	224,5	22,45	24,32
6	960	30,98	599,6	267,1	26,71	607,7	276,2	27,62	574,8	244,8	24,48	26,27
7	1260	35,50	614,2	281,7	28,17	619,2	287,7	28,77	588,8	258,8	25,88	27,61
8	1560	39,50	628,8	296,3	29,63	630,8	299,3	29,93	603,8	273,8	27,38	28,98
9	2160	46,48	643,3	310,8	31,08	643,4	311,9	31,19	614,0	284,0	28,40	30,22
10	2760	52,54	660,5	328,0	32,80	646,9	315,4	31,54	634,1	304,1	30,41	31,58
11	3360	57,97	671,0	338,5	33,85	656,0	324,5	32,45	647,2	317,2	31,72	32,67
12	3960	62,93	677,0	344,5	34,45	658,8	327,3	32,73	653,8	323,8	32,38	33,19
13	5160	71,83	693,5	361,0	36,10	672,1	340,6	34,06	661,0	331,0	33,10	34,42
14	6360	79,75	705,0	372,5	37,25	695,6	364,1	36,41	675,9	345,9	34,59	36,08
15	7560	86,95	700,5	368,0	36,80	693,3	361,8	36,18	671,0	341,0	34,10	35,69
16	9360	96,75	711,6	379,1	37,91	713,4	381,9	38,19	684,8	354,8	35,48	37,19
17	11160	105,64	717,3	384,8	38,48	723,9	392,4	39,24	694,2	364,2	36,42	38,05
18	12960	113,84	719,5	387,0	38,70	727,0	395,5	39,55	696,2	366,2	36,62	38,29
19	14760	121,49	724,6	392,1	39,21	734,9	403,4	40,34	703,2	373,2	37,32	38,96
20	18360	135,50	730,5	398,0	39,80	741,0	409,5	40,95	707,7	377,7	37,77	39,51
21	21960	148,19	733,5	401,0	40,10	744,0	412,5	41,25	712,3	382,3	38,23	39,86
22	25560	159,87	741,5	409,0	40,90	748,2	416,7	41,67	733,6	403,6	40,36	40,98
23	29160	170,76	743,8	411,3	41,13	750,7	419,2	41,92	742,7	412,7	41,27	41,44
24	32760	181,00	750,4	417,9	41,79	756,4	424,9	42,49	742,0	412,0	41,20	41,83
25	39960	199,90	757,7	425,2	42,52	762,1	430,6	43,06	751,7	421,7	42,17	42,58
26	86400	293,94	774,4	441,9	44,19	774,9	443,4	44,34	769,6	439,6	43,96	44,16

A=	0,48	kg/m²√s
Q_{cap} =	36	kg/m²
W_c =	233	kg/m³
D_w =	3,33E-06	m²/s


50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
m (kg/m²)
y = 0,4757x + 9,6287
R² = 0,927
0
50
100
150
200
250
300
√t (s^1/2)
Cellulose 1
Cellulose 2
Cellulose 3

Capillariteitsproef

NBN EN ISO 15148

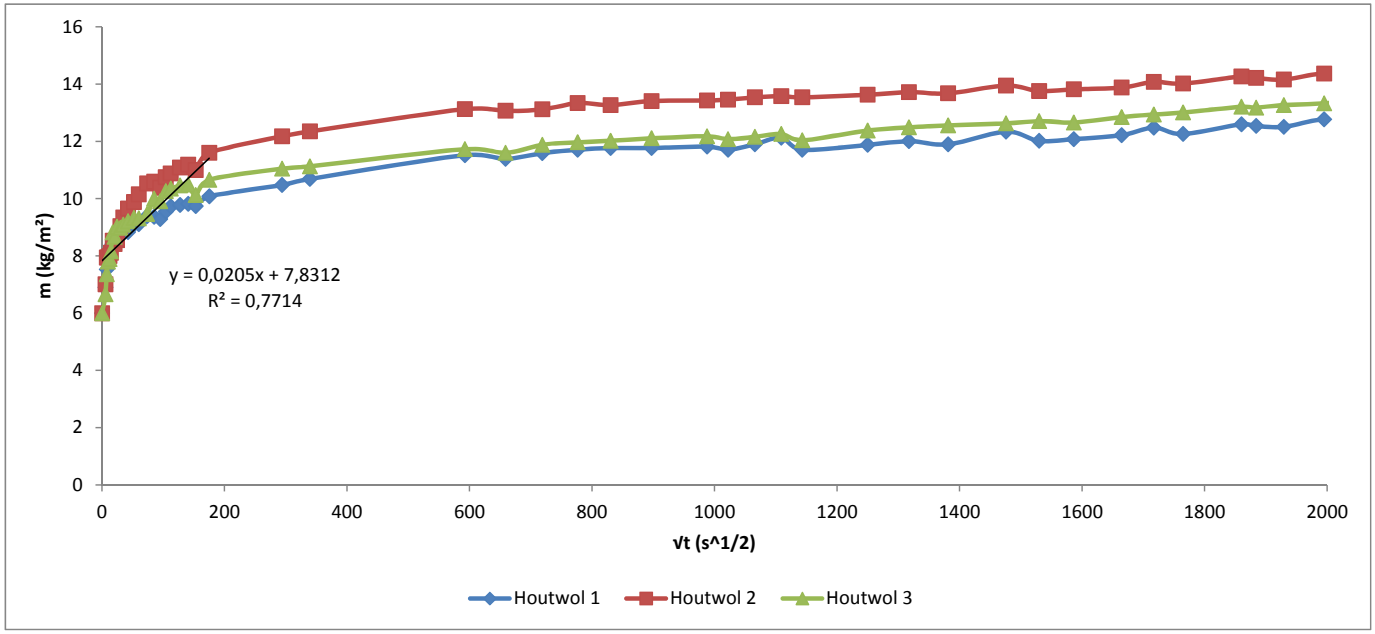
Bepaling van de waterabsorptie door gedeeltelijke onderdompeling

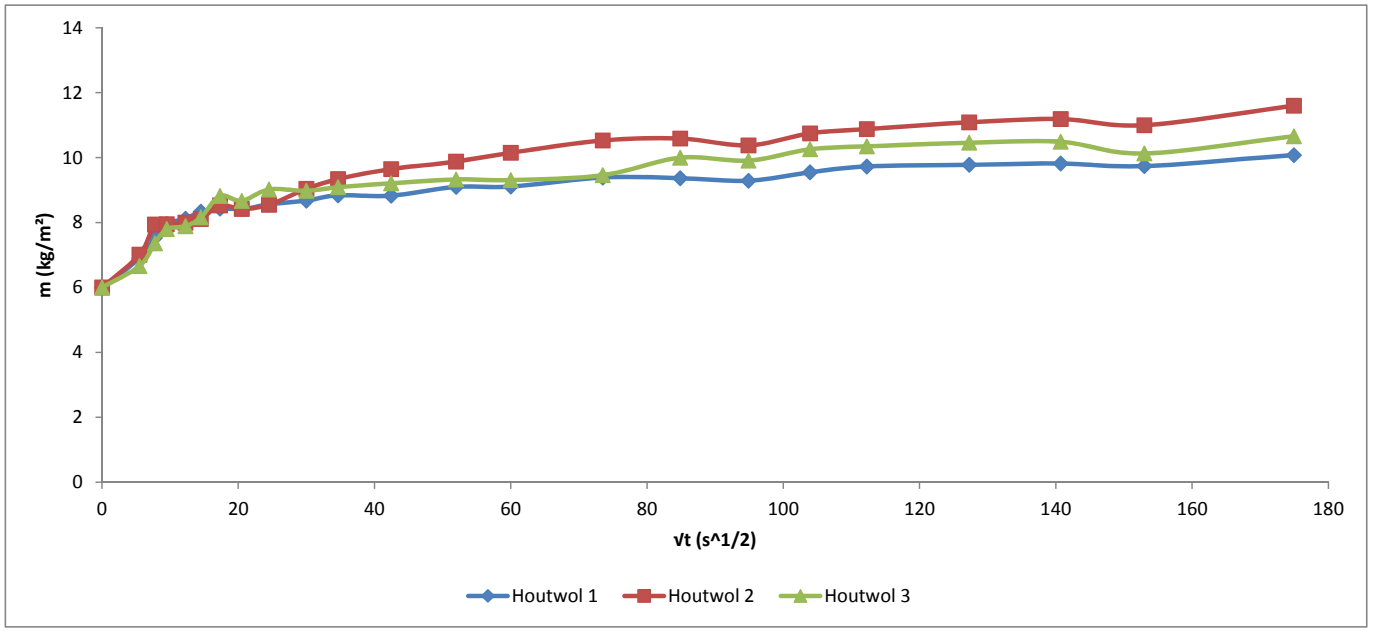
Houtwol

			HW 1			HW 2			HW 3			
A=	0,01	m²	Mo=	332,4	g	Mo=	331,5	g	Mo=	330,1	g	
Metingen	t (s)	√t (s^1/2)	Mtot(g)	Miso(g)	m(kg/m²)	Mtot(g)	Miso(g)	m(kg/m²)	Mtot(g)	Miso(g)	m(kg/m²)	m_{gem}
1	0	0,00	392,4	60,0	6,00	391,5	60,0	6,00	390,1	60,0	6,00	6,00
2	30	5,48	401,4	69,0	6,90	401,6	70,1	7,01	396,7	66,6	6,66	6,86
3	60	7,75	407,7	75,3	7,53	410,9	79,4	7,94	403,7	73,6	7,36	7,61
4	90	9,49	412	79,6	7,96	411	79,5	7,95	408,1	78,0	7,80	7,90
5	150	12,25	413,6	81,2	8,12	411,5	80,0	8,00	409,0	78,9	7,89	8,00
6	210	14,49	415,8	83,4	8,34	412,6	81,1	8,11	411,7	81,6	8,16	8,20
7	300	17,32	416,7	84,3	8,43	416,8	85,3	8,53	418,3	88,2	8,82	8,59
8	420	20,49	416,6	84,2	8,42	415,7	84,2	8,42	416,8	86,7	8,67	8,50
9	600	24,49	418	85,6	8,56	417	85,5	8,55	420,3	90,2	9,02	8,71
10	900	30,00	419,2	86,8	8,68	421,9	90,4	9,04	419,9	89,8	8,98	8,90
11	1200	34,64	420,8	88,4	8,84	424,9	93,4	9,34	421,0	90,9	9,09	9,09
12	1800	42,43	420,7	88,3	8,83	428	96,5	9,65	422,2	92,1	9,21	9,23
13	2700	51,96	423,4	91,0	9,10	430,3	98,8	9,88	423,4	93,3	9,33	9,44
14	3600	60,00	423,5	91,1	9,11	433	101,5	10,15	423,2	93,1	9,31	9,52
15	5400	73,48	426,3	93,9	9,39	436,8	105,3	10,53	424,7	94,6	9,46	9,79
16	7200	84,85	426,1	93,7	9,37	437,4	105,9	10,59	430,1	100,0	10,00	9,99
17	9000	94,87	425,3	92,9	9,29	435,3	103,8	10,38	429,2	99,1	9,91	9,86
18	10800	103,92	427,9	95,5	9,55	439	107,5	10,75	432,7	102,6	10,26	10,19
19	12600	112,25	429,7	97,3	9,73	440,3	108,8	10,88	433,6	103,5	10,35	10,32
20	16200	127,28	430,2	97,8	9,78	442,4	110,9	11,09	434,7	104,6	10,46	10,44
21	19800	140,71	430,6	98,2	9,82	443,4	111,9	11,19	435,0	104,9	10,49	10,50
22	23400	152,97	429,8	97,4	9,74	441,5	110,0	11,00	431,4	101,3	10,13	10,29
23	30600	174,93	433,2	100,8	10,08	447,5	116,0	11,60	436,7	106,6	10,66	10,78
24	86400	293,94	437,2	104,8	10,48	453,3	121,8	12,18	440,6	110,5	11,05	11,24
25	115200	339,41	439,3	106,9	10,69	455	123,5	12,35	441,4	111,3	11,13	11,39
26	351000	592,45	447,6	115,2	11,52	462,8	131,3	13,13	447,4	117,3	11,73	12,13

27	433800	658,63	446,3	113,9	11,39	462,2	130,7	13,07	446,1	116,0	11,60	12,02
28	516600	718,75	448,3	115,9	11,59	462,7	131,2	13,12	448,9	118,8	11,88	12,20
29	603000	776,53	449,5	117,1	11,71	464,9	133,4	13,34	449,8	119,7	11,97	12,34
30	689400	830,30	450,1	117,7	11,77	464,2	132,7	13,27	450,3	120,2	12,02	12,35
31	804600	896,99	450,1	117,7	11,77	465,6	134,1	13,41	451,2	121,1	12,11	12,43
32	975600	987,72	450,6	118,2	11,82	465,8	134,3	13,43	451,9	121,8	12,18	12,48
33	1044000	1021,76	449,5	117,1	11,71	466,1	134,6	13,46	450,9	120,8	12,08	12,42
34	1135800	1065,74	451,4	119,0	11,90	466,9	135,4	13,54	451,7	121,6	12,16	12,53
35	1229400	1108,78	453,7	121,3	12,13	467,3	135,8	13,58	452,7	122,6	12,26	12,66
36	1306800	1143,15	449,5	117,1	11,71	466,9	135,4	13,54	450,5	120,4	12,04	12,43
37	1562400	1249,96	451,2	118,8	11,88	467,8	136,3	13,63	453,9	123,8	12,38	12,63
38	1735200	1317,27	452,5	120,1	12,01	468,7	137,2	13,72	455,0	124,9	12,49	12,74
39	1908000	1381,30	451,4	119,0	11,90	468,3	136,8	13,68	455,7	125,6	12,56	12,71
40	2178000	1475,80	455,8	123,4	12,34	471	139,5	13,95	456,4	126,3	12,63	12,97
41	2340000	1529,71	452,6	120,2	12,02	469,1	137,6	13,76	457,2	127,1	12,71	12,83
42	2516400	1586,32	453,2	120,8	12,08	469,7	138,2	13,82	456,7	126,6	12,66	12,85
43	2770200	1664,39	454,6	122,2	12,22	470,3	138,8	13,88	458,6	128,5	12,85	12,98
44	2948400	1717,09	457,2	124,8	12,48	472,3	140,8	14,08	459,5	129,4	12,94	13,17
45	3114000	1764,65	455,0	122,6	12,26	471,7	140,2	14,02	460,2	130,1	13,01	13,10
46	3459600	1860,00	458,4	126,0	12,60	474,2	142,7	14,27	462,2	132,1	13,21	13,36
47	3549600	1884,04	457,8	125,4	12,54	473,7	142,2	14,22	461,9	131,8	13,18	13,31
48	3722400	1929,35	457,5	125,1	12,51	473,1	141,6	14,16	462,8	132,7	13,27	13,31
49	3979800	1994,94	460,1	127,7	12,77	475,2	143,7	14,37	463,4	133,3	13,33	13,49
50	4323600	2079,33	459,4	127,0	12,70	474,4	142,9	14,29	465,3	135,2	13,52	13,50

A=	0,02	$kg/m^2\sqrt{s}$
Q_{cap} =	6,2	kg/m^2
W_c =	22	kg/m^3
D_w =	6,49E-07	m^2/s


16
14
12
10
8
6
4
2
0
m (kg/m²)
y = 0,0205x + 7,8312
R² = 0,7714
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
√t (s^1/2)
Houtwol 1
Houtwol 2
Houtwol 3


14
12
10
8
6
4
2
0
m (kg/m²)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
√t (s^1/2)
Houtwol 1
Houtwol 2
Houtwol 3

Capillariteitsproef

NBN EN ISO 15148

Bepaling van de waterabsorptie door gedeeltelijke onderdompeling

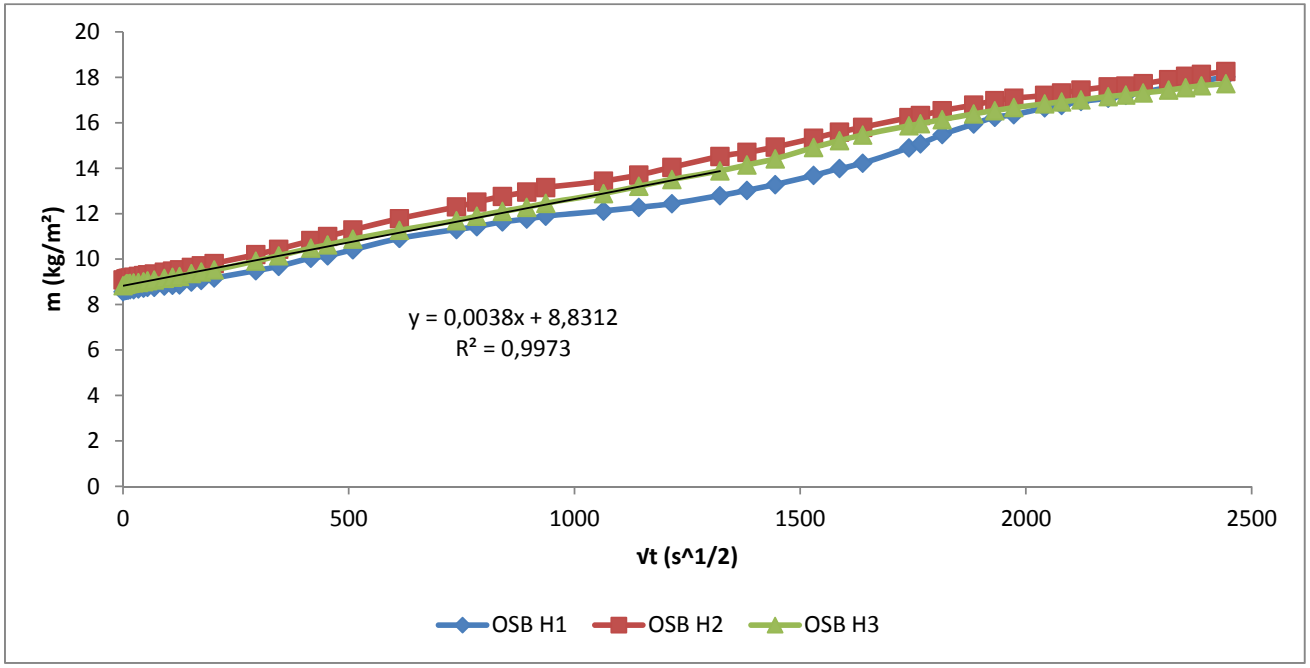
OSB Horizontaal

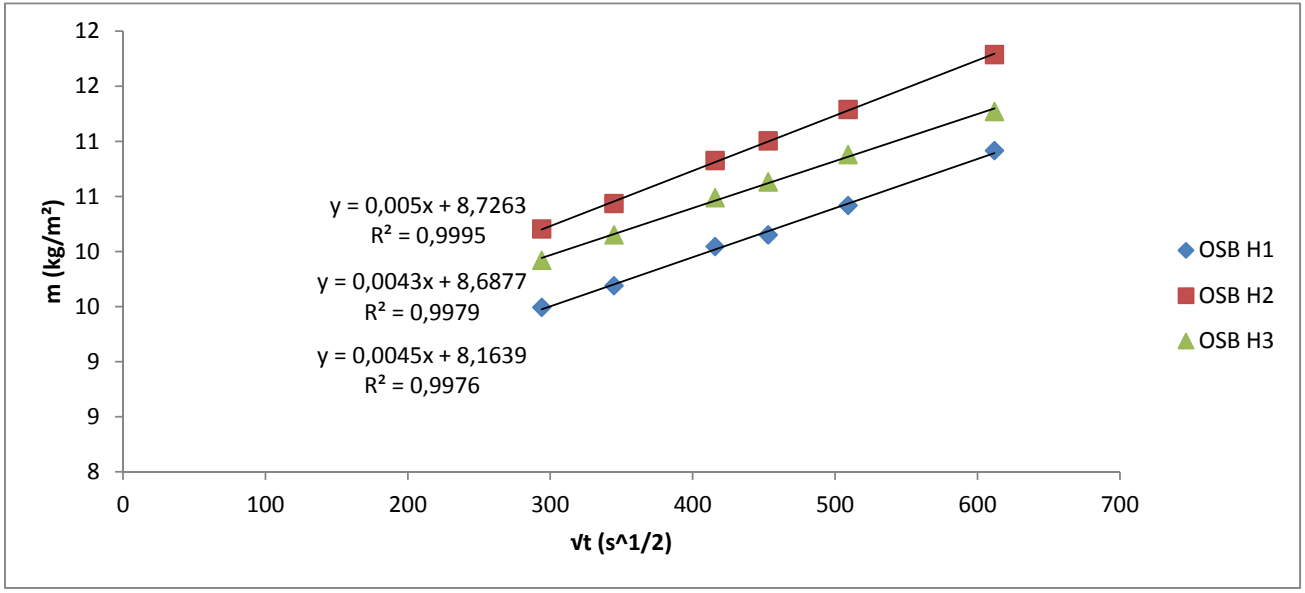
A= 0,0056 m²

			OSB H1		OSB H2		OSB H3		
Metingen	t (s)	√t (s^1/2)	M (g)	m (kg/m²)	M (g)	m (kg/m²)	M (g)	m (kg/m²)	m_{gem}
1	0	0,00	48,2	8,57	51,1	9,08	49,7	8,84	8,83
2	30	5,48	48,5	8,62	51,3	9,12	50,0	8,89	8,88
3	60	7,75	48,6	8,64	51,4	9,14	50,2	8,92	8,90
4	120	10,95	48,6	8,64	51,5	9,16	50,2	8,92	8,91
5	240	15,49	48,7	8,66	51,6	9,17	50,3	8,94	8,92
6	540	23,24	48,7	8,66	51,8	9,21	50,4	8,96	8,94
7	1140	33,76	48,9	8,69	52,0	9,24	50,5	8,98	8,97
8	2040	45,17	49,1	8,73	52,2	9,28	50,7	9,01	9,01
9	2940	54,22	49,3	8,76	52,4	9,32	50,9	9,05	9,04
10	4740	68,85	49,3	8,76	52,6	9,35	51,1	9,08	9,07
11	8340	91,32	49,6	8,82	53,0	9,42	51,5	9,16	9,13
12	11940	109,27	49,8	8,85	53,3	9,48	51,8	9,21	9,18
13	15600	124,90	49,9	8,87	53,6	9,53	52,0	9,24	9,21
14	22800	151,00	50,6	9,00	54,2	9,64	52,7	9,37	9,33
15	30000	173,21	51,0	9,07	54,6	9,71	53,1	9,44	9,40
16	40800	201,99	51,6	9,17	55,2	9,81	53,6	9,53	9,51
17	86400	293,94	53,4	9,49	57,4	10,20	55,8	9,92	9,87
18	118800	344,67	54,5	9,69	58,7	10,44	57,1	10,15	10,09
19	172800	415,69	56,5	10,04	60,9	10,83	59,0	10,49	10,45
20	205200	452,99	57,1	10,15	61,9	11,00	59,8	10,63	10,60
21	259200	509,12	58,6	10,42	63,5	11,29	61,2	10,88	10,86
22	374400	611,88	61,4	10,92	66,3	11,79	63,4	11,27	11,32
23	545400	738,51	63,6	11,31	69,2	12,30	65,8	11,70	11,77
24	613800	783,45	64,3	11,43	70,4	12,52	66,9	11,89	11,95
25	705600	840,00	65,5	11,64	71,8	12,76	68,1	12,11	12,17
26	799200	893,98	66,2	11,77	72,9	12,96	69,1	12,28	12,34

27	876600	936,27	66,9	11,89	74,0	13,16	70,1	12,46	12,50
28	1132200	1064,05	68,2	12,12	75,6	13,44	72,5	12,89	12,82
29	1305000	1142,37	69,1	12,28	77,1	13,71	74,3	13,21	13,07
30	1477800	1215,65	70,0	12,44	79,0	14,04	76,0	13,51	13,33
31	1747800	1322,04	72,0	12,80	81,7	14,52	78,1	13,88	13,74
32	1909800	1381,96	73,3	13,03	82,7	14,70	79,6	14,15	13,96
33	2086200	1444,37	74,7	13,28	84,0	14,93	81,1	14,42	14,21
34	2340000	1529,71	77,0	13,69	86,2	15,32	83,9	14,92	14,64
35	2518200	1586,88	78,7	13,99	87,7	15,59	85,6	15,22	14,93
36	2683800	1638,23	80,0	14,22	88,9	15,80	87,0	15,47	15,16
37	3029400	1740,52	83,8	14,90	91,3	16,23	89,3	15,88	15,67
38	3119400	1766,18	84,8	15,08	91,8	16,32	89,8	15,96	15,79
39	3292200	1814,44	87,1	15,48	93,0	16,53	90,8	16,14	16,05
40	3549600	1884,04	89,7	15,95	94,4	16,78	92,2	16,39	16,37
41	3727800	1930,75	91,4	16,25	95,5	16,98	93,0	16,53	16,59
42	3893400	1973,17	92,0	16,36	96,1	17,08	93,8	16,68	16,71
43	4167000	2041,32	93,7	16,66	96,8	17,21	94,7	16,84	16,90
44	4321800	2078,89	94,3	16,76	97,4	17,32	95,2	16,92	17,00
45	4501800	2121,74	95,3	16,94	98,1	17,44	95,7	17,01	17,13
46	4761000	2181,97	96,1	17,08	98,9	17,58	96,5	17,16	17,27
47	4933800	2221,22	96,8	17,21	99,1	17,62	96,9	17,23	17,35
48	5106600	2259,78	97,6	17,35	99,7	17,72	97,4	17,32	17,46
49	5364000	2316,03	98,8	17,56	100,7	17,90	98,1	17,44	17,64
50	5538600	2353,42	99,6	17,71	101,5	18,04	98,7	17,55	17,77
51	5706000	2388,72	100,3	17,83	102,0	18,13	99,2	17,64	17,87
52	5967000	2442,74	101,4	18,03	102,7	18,26	99,7	17,72	18,00

A=	0,0045	$kg/m^2\sqrt{s}$
Q_{cap} =	9,2	kg/m^2
W_c =	611,6	kg/m^3
D_w =	4,25E-11	m^2/s


20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
m (kg/m²)
y = 0,0038x + 8,8312
R² = 0,9973
0
500
1000
1500
2000
2500
√t (s^1/2)
OSB H1
OSB H2
OSB H3


12
12
11
11
10
10
9
9
8
m (kg/m²)
y = 0,005x + 8,7263
R² = 0,9995
y = 0,0043x + 8,6877
R² = 0,9979
y = 0,0045x + 8,1639
R² = 0,9976
0
100
200
300
400
500
600
700
√t (s^1/2)
OSB H1
OSB H2
OSB H3

Capillariteitsproef

NBN EN ISO 15148

Bepaling van de waterabsorptie door gedeeltelijke onderdompeling

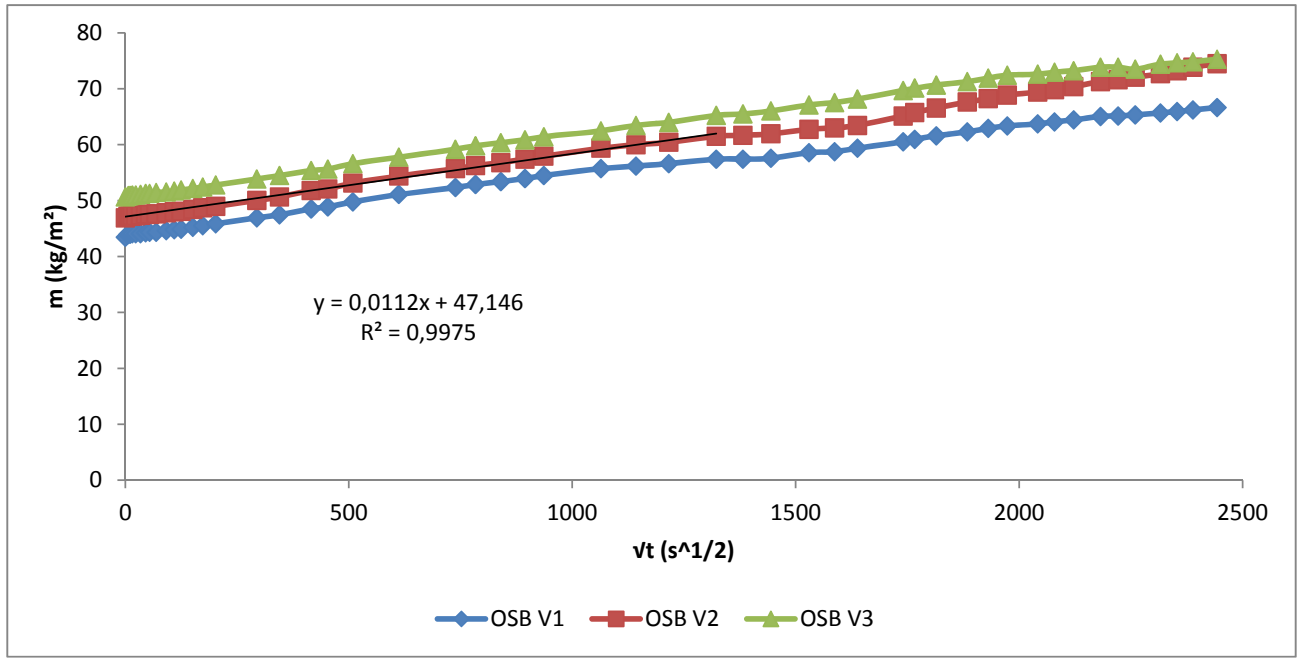
OSB Verticaal

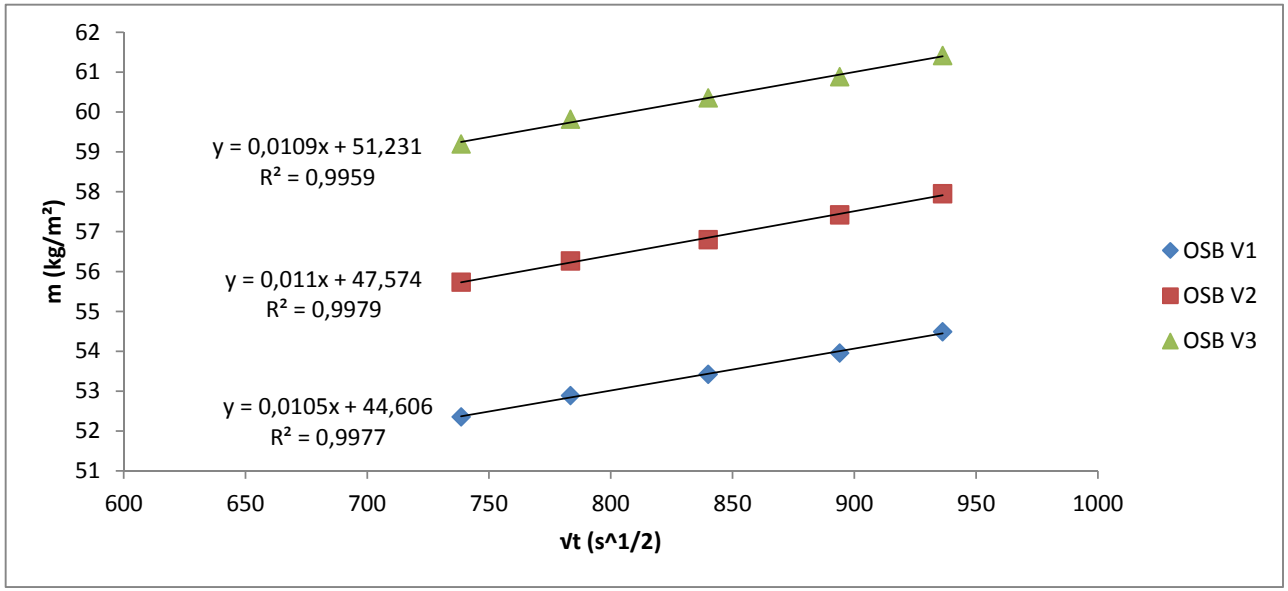
A= 0,0011 m²

			OSB V1		OSB V2		OSB V3		
Metingen	t (s)	√t (s^1/2)	M (g)	m (kg/m²)	M (g)	m (kg/m²)	M (g)	m (kg/m²)	m_{gem}
1	0	0,00	48,9	43,47	52,8	46,93	57,0	50,67	47,02
2	30	5,48	49,4	43,91	53,1	47,20	57,2	50,84	47,32
3	60	7,75	49,5	44,00	53,1	47,20	57,3	50,93	47,38
4	120	10,95	49,5	44,00	53,1	47,20	57,3	50,93	47,38
5	240	15,49	49,6	44,09	53,2	47,29	57,4	51,02	47,47
6	540	23,24	49,6	44,09	53,2	47,29	57,4	51,02	47,47
7	1140	33,76	49,6	44,09	53,3	47,38	57,5	51,11	47,53
8	2040	45,17	49,8	44,27	53,5	47,56	57,7	51,29	47,70
9	2940	54,22	49,9	44,36	53,5	47,56	57,7	51,29	47,73
10	4740	68,85	49,9	44,36	53,6	47,64	57,9	51,47	47,82
11	8340	91,32	50,2	44,62	53,8	47,82	58,0	51,56	48,00
12	11940	109,27	50,4	44,80	54,0	48,00	58,2	51,73	48,18
13	15600	124,90	50,5	44,89	54,1	48,09	58,4	51,91	48,30
14	22800	151,00	50,9	45,24	54,5	48,44	58,7	52,18	48,62
15	30000	173,21	51,2	45,51	54,8	48,71	59,0	52,44	48,89
16	40800	201,99	51,6	45,87	55,1	48,98	59,4	52,80	49,21
17	86400	293,94	52,8	46,93	56,3	50,04	60,6	53,87	50,28
18	118800	344,67	53,4	47,47	57,0	50,67	61,3	54,49	50,87
19	172800	415,69	54,6	48,53	58,3	51,82	62,3	55,38	51,91
20	205200	452,99	55,0	48,89	58,6	52,09	62,6	55,64	52,21
21	259200	509,12	56,0	49,78	59,8	53,16	63,7	56,62	53,19
22	374400	611,88	57,5	51,11	61,2	54,40	65,0	57,78	54,43
23	545400	738,51	58,9	52,36	62,7	55,73	66,6	59,20	55,76
24	613800	783,45	59,5	52,89	63,3	56,27	67,3	59,82	56,33
25	705600	840,00	60,1	53,42	63,9	56,80	67,9	60,36	56,86
26	799200	893,98	60,7	53,96	64,6	57,42	68,5	60,89	57,42

27	876600	936,27	61,3	54,49	65,2	57,96	69,1	61,42	57,96
28	1132200	1064,05	62,7	55,73	66,8	59,38	70,3	62,49	59,20
29	1305000	1142,37	63,2	56,18	67,5	60,00	71,4	63,47	59,88
30	1477800	1215,65	63,7	56,62	68,0	60,44	72,0	64,00	60,36
31	1747800	1322,04	64,6	57,42	69,2	61,51	73,4	65,24	61,39
32	1909800	1381,96	64,6	57,42	69,4	61,69	73,7	65,51	61,54
33	2086200	1444,37	64,8	57,60	69,7	61,96	74,3	66,04	61,87
34	2340000	1529,71	65,9	58,58	70,6	62,76	75,5	67,11	62,81
35	2518200	1586,88	66,1	58,76	70,9	63,02	76,0	67,56	63,11
36	2683800	1638,23	66,8	59,38	71,4	63,47	76,7	68,18	63,67
37	3029400	1740,52	68,1	60,53	73,3	65,16	78,4	69,69	65,13
38	3119400	1766,18	68,6	60,98	74,0	65,78	78,9	70,13	65,63
39	3292200	1814,44	69,3	61,60	74,9	66,58	79,5	70,67	66,28
40	3549600	1884,04	70,1	62,31	76,1	67,64	80,2	71,29	67,08
41	3727800	1930,75	70,8	62,93	76,8	68,27	80,9	71,91	67,70
42	3893400	1973,17	71,3	63,38	77,5	68,89	81,5	72,44	68,24
43	4167000	2041,32	71,7	63,73	78,1	69,42	81,7	72,62	68,59
44	4321800	2078,89	72,1	64,09	78,6	69,87	82,1	72,98	68,98
45	4501800	2121,74	72,5	64,44	79,2	70,40	82,4	73,24	69,36
46	4761000	2181,97	73,2	65,07	80,2	71,29	83,1	73,87	70,07
47	4933800	2221,22	73,3	65,16	80,6	71,64	83,1	73,87	70,22
48	5106600	2259,78	73,5	65,33	81,1	72,09	82,7	73,51	70,31
49	5364000	2316,03	73,9	65,69	81,8	72,71	83,7	74,40	70,93
50	5538600	2353,42	74,2	65,96	82,4	73,24	84,0	74,67	71,29
51	5706000	2388,72	74,5	66,22	83,1	73,87	84,2	74,84	71,64
52	5967000	2442,74	75,0	66,67	83,8	74,49	84,7	75,29	72,15

A=	0,011	$kg/m^2\sqrt{s}$
Q_{cap} =	25	kg/m^2
W_c =	611,6	kg/m^3
D_w =	2,54E-10	m^2/s


80
70
60
50
40
30
20
10
0
m (kg/m²)
y = 0,0112x + 47,146
R² = 0,9975
0
500
1000
1500
2000
2500
√t (s^1/2)
OSB V1
OSB V2
OSB V3


62
61
60
59
58
57
56
55
54
53
52
51
m (kg/m²)
y = 0,0109x + 51,231
R² = 0,9959
y = 0,011x + 47,574
R² = 0,9979
y = 0,0105x + 44,606
R² = 0,9977
600
650
700
750
800
850
900
950
1000
√t (s^1/2)
OSB V1
OSB V2
OSB V3

Bijlage B

Technische fiches

DB+

Gewapende damprem- en luchtdichtingsbaan van vochtvariabel bouwpapier

Technische gegevens:

Materiaal	Stof
Baan	Bouwpapier, verlijmd met PE
Wapening	Glasvezelwapening

Eigenschap	Keuringsnorm	Waarde
Kleur		blauw
Oppervlaktegewicht	DIN EN 1849-2	185 g/m²
Temperatuurbestendigheid		bestand tot +40 °C
µ	DIN EN 1931	10.000
Dikte	DIN EN 1849-2	0,23 mm
µd-waarde gemiddeld/vochtvariabel	DIN EN ISO 12572	2,3 m / 0,6-4 m
Brandklasse	DIN EN 13501-1	E
Max. trekkracht lengte/dwars	DIN EN 13859-1	550 N/5 cm / 300 N/5 cm
Rek lengte/dwars	DIN EN 13859-1	5 % / 5 %
Doorscheurweerstand lengte/dwars	DIN EN 13859-1	70 N / 70 N
Verouderingsbestendigheid	EN 1296 / EN 1931	doorstaan

07
EN 13984

Bord Agrément na hÉireann
Irish Agrément Board

Voorzien van CE-markering overeenkomstig DIN EN 13984.

Toepassingsgebied:

Te gebruiken als damprem en luchtdichtingsbaan bij alle diffusieopen constructies buiten, in combinatie met dak, plafond of wand - bijv. met pro clima SOLITEX-banen, zachtboard- en mdf-platen. Bij aan de buitenzijde diffusiedichte constructies van platte en schuine daken. Voor groendaken bieden de INTESANA- of de INTELLO-banen een grotere kans op het uitblijven van bouwschade. Meer informatie vindt u in de studie "Berekening van het uitblijven van bouwschade van isolatieconstructies in houtbouw en staalbouw".

Leveringsvorm:

Art.-nr.	EAN	Rollengte	Rolbreedte	Oppervlak	Rolgewicht	VE	VE/pallet
10081	4026639011039	100 m	0,75 m	75 m²	14 kg	1	24
10082	4026639011046	100 m	0,90 m	90 m²	17 kg	1	24
10083	4026639011053	100 m	1,05 m	105 m²	20 kg	1	24
10084	4026639011114	50 m	1,05 m	52,5 m²	10 kg	1	42
10085	4026639011060	100 m	1,35 m	135 m²	25 kg	1	24
10086	4026639011121	50 m	1,35 m	67,5 m²	13 kg	1	42
10087	4026639011343	50 m	1,70 m	85 m²	16 kg	1	42
10088	4026639011077	50 m	2,75 m	137,5 m²	26 kg	1	20

Bijzonderheden:

Ecologie ontmoet zekerheid. Vochtvariabele diffusieweerstand tussen 0,6 en 4 m. Met daaronder dwarslatten ter ondersteuning (max. afstand 65 cm) ook geschikt als binnenbegrenzing van inblaasisolatie.

Systeemproducten:

UNI TAPE: Kleefband; ECO COLL: Natuurlatexlijm

De weergegeven informatie heeft betrekking op de huidige stand van onderzoek en ervaringen uit de praktijk. Wij behouden ons het recht voor om de aanbevolen constructies en de verwerking, de verdere ontwikkeling en de daarmee gepaard gaande kwaliteitsverandering van de afzonderlijke producten te wijzigen. Op het tijdstip van montage informeren wij u graag over het actuele kennisniveau.

Verdere informatie over de verwerking en de constructiedetails vindt u in de pro clima planningsdocumentatie of via het Techniek-Hotline:
BE Tel.: +32 (0) 15 62 19 35
NL Tel.: +31 (0) 57 55 64 805

pro clima België
ISOPROC cvba
Kapelstraat 1
1980 Zemst
Tel. : +32 (0) 15 62 39 35
Fax.: +32 (0) 15 62 39 36
info@isoproc.be
www.be.proclima.com

pro clima Nederland
Warmteplan BV
Mercuriusweg 5
NL 6971 GV Brummen
Tel.: +31 (0) 575 564805
Fax: +31 (0) 575 564815
info@warmteplan.nl
www.nl.proclima.com

pro clima®

INTELLO®

Uiterst effectieve damprem
Voor vezelvormige isolatiematerialen in mat- en plaatvorm

Technische gegevens:

Materiaal	Stof
Vlies	Polypropyleen
Membraan	Polyethyleen-copolymeer

Eigenschap	Keuringsnorm	Waarde
Kleur	-	wit-transparant
Oppervlaktegewicht	DIN EN 1849-2	85 g/m²
Temperatuurbestendigheid	-	-40 °C tot +80 °C
µ	DIN EN 1931	37.500
Dikte	DIN EN 1849-2	0,2 mm
µd-waarde gemiddeld/vochtvariabel	DIN EN 1931	7,5 m / 0,25-10 m
Brandklasse	DIN EN 13501-1	E
Brandkengetal	volgens VKF	5.3
Max. trekkracht lengte/dwars	DIN EN 12311-2	120 N/5 cm / 90 N/5 cm
Rek lengte/dwars	DIN EN 12311-2	50 % / 45 %
Doorscheurweerstand lengte/dwars	DIN EN 12311-2	60 N / 60 N
Verouderingsbestendigheid	EN 1296 / EN 1931	doorstaan

Voorzien van CE-markering overeenkomstig DIN EN 13984.

CE
07
EN 13984

iab
Bord Agrément na hÉireann
Irish Agrément Board

Toepassingsgebied:

Te gebruiken als damprem en luchtdichtingsbaan bij alle diffusieopen constructies buiten, bijv. met onderdakbanen (pro clima SOLITEX) of zachtboard- en mdf-platen. Voor het uitblijven van bouwschade bij bouwfysisch veeleisende constructies, zoals diffusiedichte platte daken/schuine daken en groendaken. Ook onder extreme klimaatomstandigheden buiten, zoals in het hooggebergte.
Meer informatie vindt u in de studie "Berekening van het uitblijven van bouwschade van isolatieconstructies in houtbouw en staalbouw".

Leveringsvorm:

Art.-nr.	EAN	Rollengte	Rolbreedte	Opper-vlak	Rolgewicht	VE	VE/pallet
10091	4026639011176	20 m	1,50 m	30 m²	3 kg	1	42
10090	4026639011190	50 m	1,50 m	75 m²	7 kg	1	20
10077	4026639011985	50 m	3,00 m	150 m²	14 kg	1	20
12221	4026639122216	50 m	3,00 m (op 1,60 m gevouwen)	150 m²	14 kg	1	20

Bijzonderheden:

De allrounder onder de dampremmen met een bijzonder grote, in elk klimaatbereik werkzame variabiliteit van de diffusieweerstand van 0,25 m tot meer dan 10 m µd-waarde. 's Winters diffusiedichter => hoge bescherming tegen vocht, 's zomers meer diffusieopen => extreem hoge uitdroging = maximale bescherming tegen bouwschade.

Systeemproducten:

TESCON VANA: Kleefband; TESCON No.1: Kleefband; ORCON F: Aansluitlijm; ORCON CLASSIC: Aansluitlijm

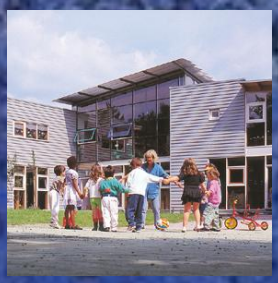
De weergegeven informatie heeft betrekking op de huidige stand van onderzoek en ervaringen uit de praktijk. Wij behouden ons het recht voor om de aanbevolen constructies en de verwerking, de verdere ontwikkeling en de daarmee gepaard gaande kwaliteitsverandering van de afzonderlijke producten te wijzigen. Op het tijdstip van montage informeren wij u graag over het actuele kennisniveau.

Verdere informatie over de verwerking en de constructiedetails vindt u in de pro clima planningsdocumentatie of via het Techniek-Hotline:
BE Tel.: +32 (0) 15 62 19 35
NL Tel.: +31 (0) 57 55 64 805

pro clima België
ISOPROC cvba
Kapelstraat 1
1980 Zemst
Tel. : +32 (0) 15 62 39 35
Fax.: +32 (0) 15 62 39 36
info@isoproc.be
www.be.proclima.com

pro clima Nederland
Warmteplan BV
Mercuriusweg 5
NL 6971 GV Brummen
Tel.: +31 (0) 575 564805
Fax: +31 (0) 575 564815
info@warmteplan.nl
www.nl.proclima.com

pro clima®



isofloc®
isolatietechniek

Natuurlijk isoleren met het isofloc isolatiesysteem……

1. Warm in de winter

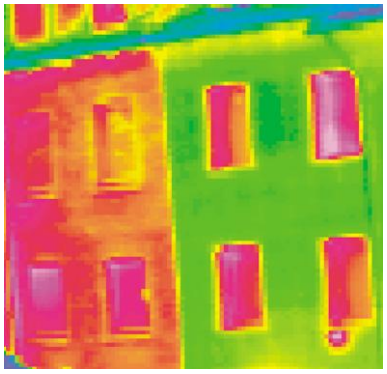
Met isofloc cellulose-isolatie ligt de temperatuur van de binnen-oppervlakken hoog zodat reeds bij relatief lage luchttemperaturen de ideale comforttemperatuur wordt bereikt.

2. Koel in de zomer

Door zijn hoog soortelijk gewicht en hoge soortelijke warmte biedt isofloc een goede weerstand tegen hittedoorslag.

3. Vochtregulerend

Het dampopen isofloc-isolatiesysteem heeft een gunstige invloed op het binnenklimaat omdat schommelingen in luchtvochtigheid worden uitgevlakt.



4. Efficiënt

Investeren in isofloc-isolatie betekent energie besparen op een rendabele wijze. Men mag zich meer en meer verwachten aan kostenstijgingen op het vlak van energie en milieu. Daarom is het op lange termijn ook economisch zinvol ecologisch te bouwen.

5. Zekerheid met garantie

De hoge voorverdichting van de elastische isofloc-natuurvezels klemt de isolatielaag stevig tussen de begrenzingen in. Daardoor zijn zettingen van de isofloc-isolatielaag uitgesloten. Alle isofloc-plaatsings-bedrijven zijn geschoold om de vereiste dichtheid te realiseren en te verifiëren.

6. Exact passend

Door de machinale verwerking op de werf neemt isofloc steeds perfect de vorm aan van het te isoleren vak, zonder kieren, zonder tocht-verschijnselen. Het pneumatisch inblazen van de holle ruimten garandeert een volledige vulling.

7. Duurzaam

Het hoofdbestanddeel van isofloc-isolatie is gerecycleerd krantenpapier. Reeds van bij het productieproces wordt het milieu dus ontzien. Maar ook bij afbraak of verbouwing ontstaan er geen afvalproblemen: de isofloc kan opnieuw worden toegepast.

8. Geluidsisolerend

De hoge densiteit en zijn hoog soortelijk gewicht maken isofloc een perfect geluidsisolerend materiaal.

9. Brandvertragend

Door de toevoeging van boorzouten en –zuren en de toepassingswijze reageert isofloc-isolatie als een massieve balk. Aan de oppervlakte vormt zich een laagje koolstof dat verdere verspreiding van de brand vertraagt.

Celit
Houtvezelplaten

Beschermen…

Bescherming tegen weer en wind:
De isolatiebeschermlaag aan de buitenzijde, zoals bijvoorbeeld het Celit 4D onderdak, biedt bescherming tegen regen, stuifsneeuw en ijzige wind. Door de isolerende werking van de houtvezelplaat worden constructieve koudebruggen, ondermeer ter hoogte van de dakbalken, onderbroken.

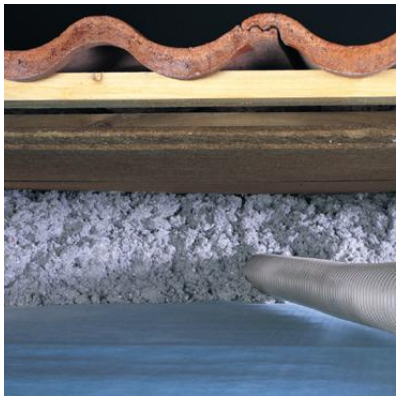
isofloc
isolatietechniek

…Isoleren…

Isolatie op maat:
Isofloc cellulose-isolatie minimaliseert de warmteverliezen door de perfecte vulling van de compartimenten.

Optimale warmte-isolatie

De sleutel voor een optimale warmte-isolatie is de exact passende isolatielaag. Met de door isofloc op punt gestelde werkwijze wordt de isolatielaag niet enkel zonder voegen, maar ook zonder versnijden en zonder afval aangebracht. Door de pneumatische vulling van de holle compartimenten zijn er geen onvolkomenheden, noch kieren of zwakke plekken. Isoleren met isofloc cellulose-isolatie betekent dan ook isoleren met grote onderscheiding.



Het inblazen

In daken, vloeren en wanden wordt isofloc cellulose-isolatie tussen de dakbalken, roostering of stijlen ingeblazen. Door de overdruk bij het inblazen neemt het materiaal de vorm aan van de te isoleren compartimenten, en dit sterk verdicht. Ook technische installaties, onregelmatige afstanden, kromme balken en andere details beletten niet dat de isolatie doordringt tot in de verste uithoeken.

Het sproeien

Voor massieve wanden, houtskeletbouw en geluidsisolerende wanden biedt het sproeien van isofloc cellulose-isolatie de perfecte oplossing. In één enkele arbeidsgang kan tot 20 cm exact aansluitende isolatie op een wand worden aangebracht. Om de binding tussen de cellulosevezels te activeren, worden de isolatievlokken licht bevochtigd. Ook hier sluit de isolatie probleemloos aan rond ingebouwde leidingen en andere technische voorzieningen

Het open blazen

Deze werkwijze is de rationele oplossing bij het isoleren van niet-gebruikte zolders van woningen, openbare gebouwen en industriehallen, zowel bij sanering als bij nieuwbouw. De isofloc cellulose-isolatie wordt dan gewoon rechtstreeks van op de vrachtwagen in de blaasmachine geschud en via de slangen tot op de plaats van toepassing gebracht.

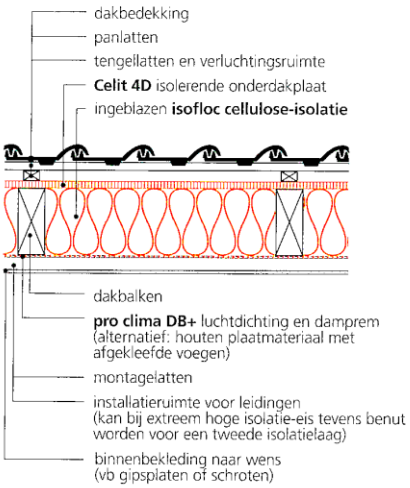
...Dichten

Dichten om te isoleren:
Het zorgvuldig geplaatste pro clima luchtdichtingssysteem verhindert tochtverschijnselen. Het beschermt zowel tegen ongewenste energieverliezen als tegen condensatie door convectie.

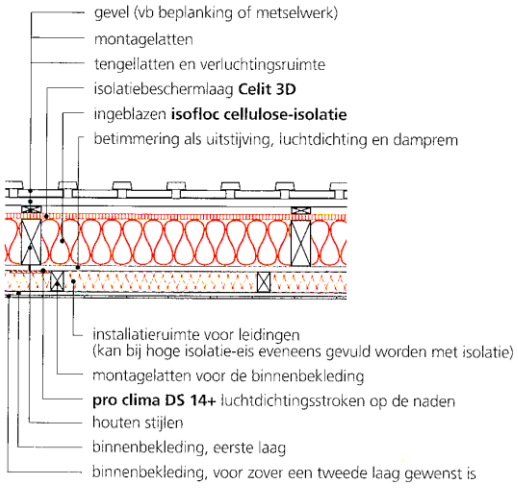
Competentie

Constructies met isofloc cellulose-isolatie zijn damp-open, een bijkomende bescherming tegen bouwschade.

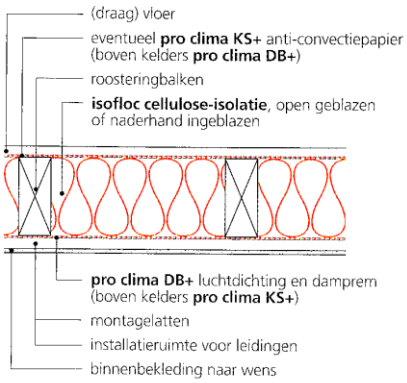
Dak



Wand



Vloer



Technische gegevens / Uw isofloc partner

Technische gegevens cellulose-isolatie isofloc L

warmtegeleidingscoëfficiënt (DIN 4108) λ:	0,039 W/(m.K)
densiteit:	30-60 kg/m³
diffusieweerstandsgetal μ:	1 – 2
soortelijke warmte c:	2150 J/(kg.K)
pH-waarde:	pH ± 8 (niet corrosiebevorderend)
brandklasse (DIN 4102):	B 2 (normaal brandbaar)
brandklasse (NBN S21-203):	A1
brandweerstand:	30, 60, 90 min. (afhankelijk van gehele wandopbouw)
productie-energie (uit waterkracht):	0,12kWh/kg

Grondstoffen: zuiver, voorgesorteerd krantenpapier, voornamelijk van niet-verkochte kranten, + 8% boorzout en –zuur.
Vergunningen: Technische goedkeuring van het DIBt (Duits Instituut voor Bouwtechniek) : isofloc L vergunning nr. Z 23.11-280. CE-markering en Europese technische goedkeuring : ETA-05/0191.

Uw partner in isolatietechniek

Na een intensieve vorming kunnen geïnteresseerde aannemers gelicentieerd plaatsingsbedrijf worden. Ze worden regelmatig bijgeschoold en over de laatste ontwikkelingen binnen het vakgebied ingelicht. Laat u adviseren: onze plaatsingsbedrijven vinden de op maat gesneden oplossing voor uw nieuwbouw- of renovatieplannen.
Ook in uw buurt bevindt er zich waarschijnlijk één van de meer dan 500 isofloc-partners. Zij staan ter uwer beschikking voor advies, professionele uitvoering en garantie op het door hen voorgestelde isolatiesysteem.

Kwaliteitsmanagement stap voor stap

1. Enkel een isolatie die voldoende verdicht is, houdt levenslang stand.
2. isofloc legt als fabrikant de verdichtingen noodzakelijk voor een levenslange stabiliteit op aan zijn plaatsingsbedrijven.
3. De vereiste hoeveelheid isolatiemateriaal kan op elke werf eenvoudig bepaald worden: de berekeningswijze is afgedrukt op elke zak.
4. Het aantal verwerkte zakken isofloc kan op de werf worden geteld.
5. Bij elke uitvoering wordt een werfverslag opgesteld.
6. Het plaatsingsbedrijf staat borg voor een onberispelijke uitvoering.

Dat is wat wij verwachten van een kwalitatief hoogstaande isolatie. Wenst u een offerte voor cellulose-isolatie, vraag dan tevens de densiteit te vermelden. Vraag de fabrikant ook welke procedure hij volgt voor het bepalen van de vereiste verdichtingen en welke toeslagen hij zekerheidshalve oplegt.

Zelf uitvoeren? Alle voorbereidende werk kan u, in overleg met het plaatsingsbedrijf, zelf aan. Met uw assistentie brengt een gekwalificeerde medewerker van het plaatsingsbedrijf op een minimum van tijd de isolatie aan volgens de regels der kunst. U heeft een perfecte isolatie en tegelijkertijd veel geld bespaard.

isofloc beschermt tegen koude en hitte. Isolatie van daken en buitenmuren van het passiefhuiskantoor van CIT Blaton in Schaarbeek, een passiefhuiswoning in Bocholt

en een gebouw met winkel, 2 appartementen en ontwerpbureau te Brussel

isofloc wordt zowel toegepast als akoestische bekleding (geluidsabsorptie) van zolderingen en wanden, bijvoorbeeld in filmzalen,

als voor geluidsisolatie, zoals in dit kasteeltje in Oostkamp dat werd omgebouwd tot school (isolatie van dak, buitenmuren en vloeren)

Een demonstratie overtuigde de brandweer ervan dat isofloc het aangewezen materiaal was voor de isolatie van de complexe dakvormen van 20 appartementsgebouwen met elk 15 wooneenheden.

Intussen werd reeds een brandweerkazerne met isofloc geïsoleerd

De vreemdste vormen kunnen worden geïsoleerd met isofloc, ofwel door inblazen,

ofwel door besproeien, zoals de gewelven van deze basiliek in Berchem

Reeds in de jaren twintig van de vorige eeuw werd cellulose ingeblazen.

De moderne apparatuur die nu ter beschikking staat laat toe grote projecten voordelig uit te voeren, zoals de verbouwing van deze school tot kantoren in Namen en een passiefhuisschool in Nijvel.

Niet enkel voor realisaties met een voorbeeldfunctie zoals het Eco-huis in Antwerpen beschikt isofloc over serieuze troeven,

ook voor uw eigen project kan u voor technisch advies, adressen van aannemers en handelaars en andere informatie terecht bij:

Kapelstraat 1
B – 1980 Zemst
tel.: 015/62.39.35
fax: 015/62.39.36
info@isoproc.be
www.isoproc.be

STEICO zell

Houtvezel : inblaas-isolatie

Milieuvriendelijke **isolatieproducten** uit natuurlijke **houtvezels**

NIEUW!
Geoptimaliseerde verpakking

TOEPASSINGSGEBIEDEN

Uitermate geschikt voor het isoleren van afgesloten holle ruimtes.

Thermische en akoestische isolatie van daken, wanden en vloeren.

Ideale isolatie bij renovatie en houtskeletbouw.

Uitermate praktisch bij prefab-isolatie van wand- en dakelementen.

- Isolatie zonder kieren of naden : homogene vulling
- Uitstekende isolatie zowel tegen de kou als tegen de hitte
- Zeer dampopen : ideaal voor een gezond woonklimaat
- Geen verzakking dankzij de speciale vezelstructuur
- Geen materiaalverlies – geen zaagresten
- Plaatsing door geschoolde verwerkers met licentie
- Recycleerbare houtvezels uit puur dennenhout van constante kwaliteit
- Optimale geluidsisolatie in combinatie met STEICO houtvezelplaten
- Natuurvriendelijk : prijs ontvangen voor ecologisch product (Duitsland 1999)

Voor meer informatie en verwerkingsvoorschriften :
raadpleeg uw vakhandel of kijk op www.steico.com

HANDIG FORMAAT

(ideaal voor een flexibele verwerking op de bouwplaats)

Verpakking in PE-zakken van 15 kg
21 zakken per pallet = 315 kg/pallet
Afmeting pallets = ong. 0,80*1,20*2,60 m (L*B*H*)

INDUSTRIEVERPAKKING

Verpakking in balen van 20 kg, los gestapeld op pallets. Pallets worden voorzien van wikkelfolie en extra beschermkap
18 balen per pallet = 360 kg/pallet
Afmeting pallets = ong. 0,80*1,20*2,30 m (L*B*H*)

Andere verpakkingsmogelijkheden op aanvraag

OPSLAG/TRANSPORT

STEICO*zell* moet droog gestockeerd worden.

De folie-verpakking slechts verwijderen nadat de pallet op een droge, vlakke en stabiele ondergrond staat.

MATERIAAL

Houtvezels geproduceerd en gecontroleerd volgens Algemene Europese Toelating 12/0011.

Zorg steeds voor een goede stofafzuiging en stofmasker indien het inblazen in een gesloten ruimte plaatsvindt.

TECHNISCHE KENMERKEN STEICO*zell*

Enkel verwerkers met een STEICO licentie kunnen STEICO*zell* inblazen. Deze licentie wordt verstrekt na het volgen van een opleiding.	
Algemene Europese Toelating (ETA)	12/0011
Algemene Duitse bouwgoedkeuring	Deutsches Institut für Bautechnik Z-23.11-1120
Brandklasse volgens EN 13501-1	E
Warmtegeleidingscoëfficient λ_D [W/(m*K)]	0,038
Aanbevolen densiteit ρ [kg/m³] Los verblazen (vloeren) ..... Inblazen : - daken < 45°, vloeren, plafonds..... - daken > 45°, wanden.....	 +/- 32-38 +/- 35-42 +/- 38-45
Weerstand tegen diffusie van waterdamp μ	1-2
Specifieke warmtecapaciteit c [J/(kg*K)]	2.100
Recyclagecode (EAK)	030105/170201

Productie gecertificeerd volgens ISO 9001:2008

STEICO natuurlijk beter isoleren

Uw STEICO vakhandel

www.steico.com

Gedrukt op FSC-gecertificeerd papier | datum 03 / 2012. Vermeldingen in de actuele uitgave zijn van kracht. Vergissingen voorbehouden.

STEICO construction

I-liggers voor daken, vloeren en wanden

Bouwelementen – natuurlijk van hout

TOEPASSINGSGEBIEDEN

Stijlen voor sterk geïsoleerde wanden met beperking van koudebruggen

Liggers voor **vloeren** in houtstkeletbouw of metselwerk

Liggers voor **daken** in houtskeletbouw of metselwek

- Beperking van koudebruggen
- Zeer stabiel, ook in grote lengtes
- Licht in gewicht
- Extreem sterk : grote spanwijdtes
- Eenvoudige installatie van leidingen
- Ook beschikbaar mèt isolatie
- Gemakkelijk te verzagen
- Flenzen uit hoogkwalitatief gelamineerd fineerhout STEICO*ultralam* of uit gedroogd, machinaal gesorteerd en gevingerlast dennehout.
- Kernplaat uit hoogwaardig 'natural fibreboard'
- ETA : European Technical Approval (Europese Technische Goedkeuring), CE - markering, FSC gecertificeerd

Meer informatie vindt u op **www.steico.com**

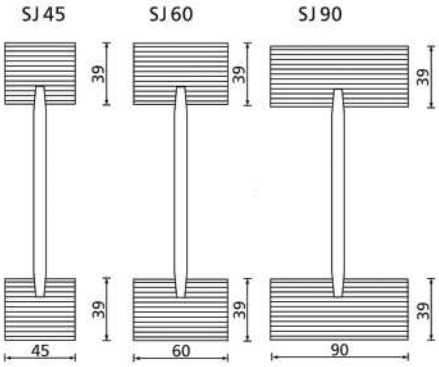
STEICO*joist*

I-liggers voor daken en vloeren

I-liggers voor toepassing in dak- en vloer-constructies met hoge sterkte-eisen.

Bijzondere kenmerken :

- 8 mm dikke kernplaat voor het opnemen van hoge dwarskrachten
- zeer hoge kwaliteitsklasse voor de flenzen

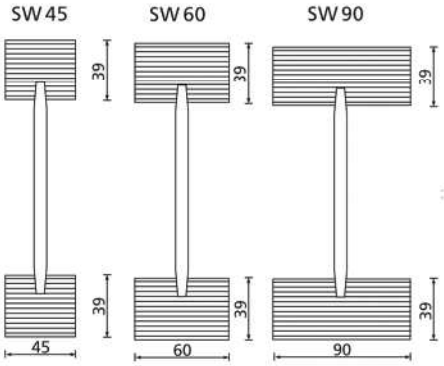


STEICO*wall*

I-liggers voor wanden

Bijzondere kenmerken :

- kernplaat van 6 mm dikte ter beperking van koudebruggen
- zeer licht in gewicht



STEICO*joist* EN STEICO*wall* : PRODUCTEN UIT DE NATUUR

De grondstof voor de I-liggers is hout. Hout wordt sinds eeuwen gebruikt als bouwmateriaal en heeft al méér dan zijn diensten bewezen in dak-, vloer- en wandconstructies. Met STEICO*joist* en STEICO*wall* benutten we alle eigenschappen van hout als bouwmateriaal, maar in een verbeterde vorm. De I-liggers zijn zó ontworpen, dat er slechts materiaal gebruikt wordt waar strikt noodzakelijk. STEICO*joist* en STEICO*wall* zijn bijgevolg net zo sterk als massief houten balken maar duidelijk lichter in gewicht . Bovendien verminderen ze het energieverbruik in de woning door het beperken van koudebruggen.

Voor de flenzen van onze I-liggers gebruiken we hoogkwalitatief gelamineerd fineerhout STEICO ultralam of machinaal gesorteerd en gevingerlast dennehout : een garantie voor een constante kwaliteit van hoog niveau met vastgelegde sterktes.

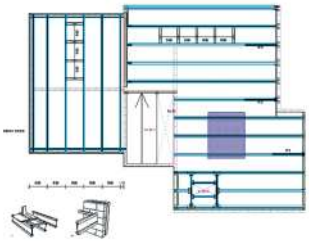
Als kernplaat gebruiken we speciale hardboardplaten, voorzien van een V-groef over de lengte. Deze hardboardplaten beschikken over een bijzonder grote schuifsterkte. De flenzen worden met de kernplaat samengevoegd d.m.v. vochtbestendige bindmiddelen. Het productieproces verloopt volledig automatisch volgens de nieuwste technologieën.

VOORGEÏSOLEERDE I-LIGGERS

Eén van onze specialiteiten is de voorgeïsoleerde I-ligger. Zowel STEICO*joist* als STEICO*wall* kunnen af fabriek geleverd worden mét de isolatie tussen de flenzen. De aangebrachte isolatie is een klassieke houtvezelisolatieplaat uit het STEICO assortiment. De voorgeïsoleerde liggers laten zich - dankzij hun rechthoekige vorm - behandelen als gewone massieve balken of stijlen. Hierdoor wordt het werk op de bouwwerf uiteraard een stuk gemakkelijker.

MINDER KOUDEBRUGGEN

Door de stijgende energiekosten groeit het belang aan een goede isolatie in de woning. Maar dit betekent ook dat men des te meer aandacht moet besteden aan de constructieve onderdelen van het gebouw. Massief houten stijlen, balken of kepers laten toe dat de warmte van binnen naar buiten kan ontsnappen, zowel in het dak als doorheen de wanden van uw woning. Ze vormen zogenaamde thermische bruggen of koudebruggen. Door het uitgekiende I-profiel van STEICO*joist* en STEICO*wall* met een kernplaat van slechts 6 of 8 mm worden deze koudebruggen tot een minimum herleid.



IDEALE COMBINATIE MET STEICO ISOLATIEPRODUCTEN EN STEICO*ultralam*

De I-liggers kunnen perfect gecombineerd worden met de isolatieproducten van STEICO op basis van hout of hennep (flexibele en rigide platen alsook inblaasisolatie). Voor verstevigingen, onder- en bovenregels, randbalken, enz. kan men beroep doen op STEICO*ultralam* – gelamineerd fineerhout. Zowel voor nieuwbouw als voor renovatie biedt STEICO een ideaal systeem voor een optimaal geïsoleerde, milieuvriendelijke en energie-efficiënte woning !

LICHT IN GEWICHT EN TOCH EEN HOOG DRAAGVERMOGEN

Met I-liggers is men in staat tegemoet te komen aan de wensen van ontwerpers van nieuwe woningen : grote spanwijdtes creëren zonder het gewicht van de bouwelementen te verzwaren. I-liggers wegen tot 50 % lichter in vergelijking tot massief houten balken of stijlen. Hierdoor vergemakkelijkt men het werk op de bouwplaats en bespaart men al snel vele dure arbeidsuren. Bovendien wordt het gebruik van een kraan overbodig.

AANBRENGEN VAN GATEN VOOR LEIDINGEN

In moderne gebouwen wordt het aantal te voorziene leidingen voor electriciteit, loodgieterij of airconditioning met de dag groter. In STEICO*joist* kan men eenvoudig gaten boren in de kernplaat zonder afbreuk te doen aan het draagvermogen van de ligger - mits inachtname van een aantal vuistregels

BRANDGEDRAG

De onderdelen van STEICO*joist* en STEICO*wall* zijn gecertificeerd volgens EN 13501-1:2002: D-s2,d0

KWALITEITSGARANTIE

NFB Natural FiberBoard

- Flenzen van hoogwaardig gelamineerd fineerhout STEICO ultralam of van ovengedroogd, machinaal gesorteerd en gevingerlast dennehout
  - uiterst hoge druk- en treksterkte
  - hoge kwaliteitsklasse
- Kernplaat uit Natural Fibre Board, volgens EN 622-2
  - natuurlijke bindmiddelen
  - extreem sterk
  - hoge schuifsterkte (14 N/mm²) en buigweerstand (31 N/mm²)
- Volledig automatisch productieproces volgens de nieuwste technologieën

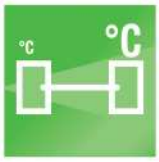
BIJKOMENDE SERVICE

- Technische ondersteuning
- Software voor berekeningen en ontwerp
- Aangepaste verbindingsmiddelen beschikbaar bij o.a. Simpson Strong-Tie en ITW Industry

SIMPSON Strong-Tie

ALLE I-LIGGERS IN ÉÉN OOGOPSLAG

Beperking van koudebruggen



Probleemloos aanbrengen van gaten voor leidingen en installaties

Licht in gewicht. Snelle behandeling – eenvoudige plaatsing

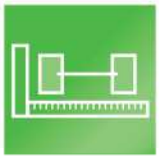
Dimensioneel stabiel dankzij gecontroleerde vochtigheid

Verkrijgbaar mét isolatie

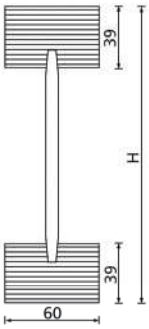
Hoog draagvermogen, grote spanwijdtes

Gemakkelijk verwerkbaar met de gangbare houtbewerkingsmachines

Strikte productietoleranties



Type	Flens uit dennehout b*h [mm]	Flens uit gelamineerd fineerhout b*h [mm]	Hoogte H [mm]	Gewicht [kg / m]
STEICO*joist* SJ 45	45*45	45*39	200	2.9
	45*45	45*39	240	3.2
	45*45	45*39	300	3.7
	45*45	45*39	360	4.2
STEICO*joist* SJ 60	60*45	60*39	200	3.5
	60*45	60*39	240	3.9
	60*45	60*39	300	4.3
	60*45	60*39	360	4.8
	60*45	60*39	400	5.0
STEICO*joist* SJ 90	90*45	90*39	200	4.8
	90*45	90*39	240	5.1
	90*45	90*39	300	5.6
	90*45	90*39	360	6.2
	90*45	90*39	400	6.4
STEICO*wall* SW 45	45*45	45*39	160	2.4
	45*45	45*39	200	2.7
	45*45	45*39	240	2.9
	45*45	45*39	300	3.3
	45*45	45*39	360	3.7
STEICO*wall* SW 60	60*45	60*39	160	3.0
	60*45	60*39	200	3.3
	60*45	60*39	240	3.5
	60*45	60*39	300	3.9
	60*45	60*39	360	4.3
	60*45	60*39	400	4.5
STEICO*wall* SW 90	90*45	90*39	240	4.8
	90*45	90*39	300	5.2
	90*45	90*39	360	5.7
	90*45	90*39	400	5.8



I-liggers zijn verkrijgbaar in lengtes tot 16 meter.
Standaardlengtes : 9 m / 11 m / 12 m / 13 m
Andere lengtes en speciale zaagsneden op aanvraag.

STEICO*joist* en STEICO*wall* zijn ook verkrijgbaar mét isolatie

CE

FSC www.fsc.org FSC® C004750 Het keurmerk voor verantwoord bosbeheer

BBA British Board of Agrément European Technical Approval ETA-06/0238

Productie gecertificeerd volgens ISO 9001:2008

MIX Paper FSC® C006645

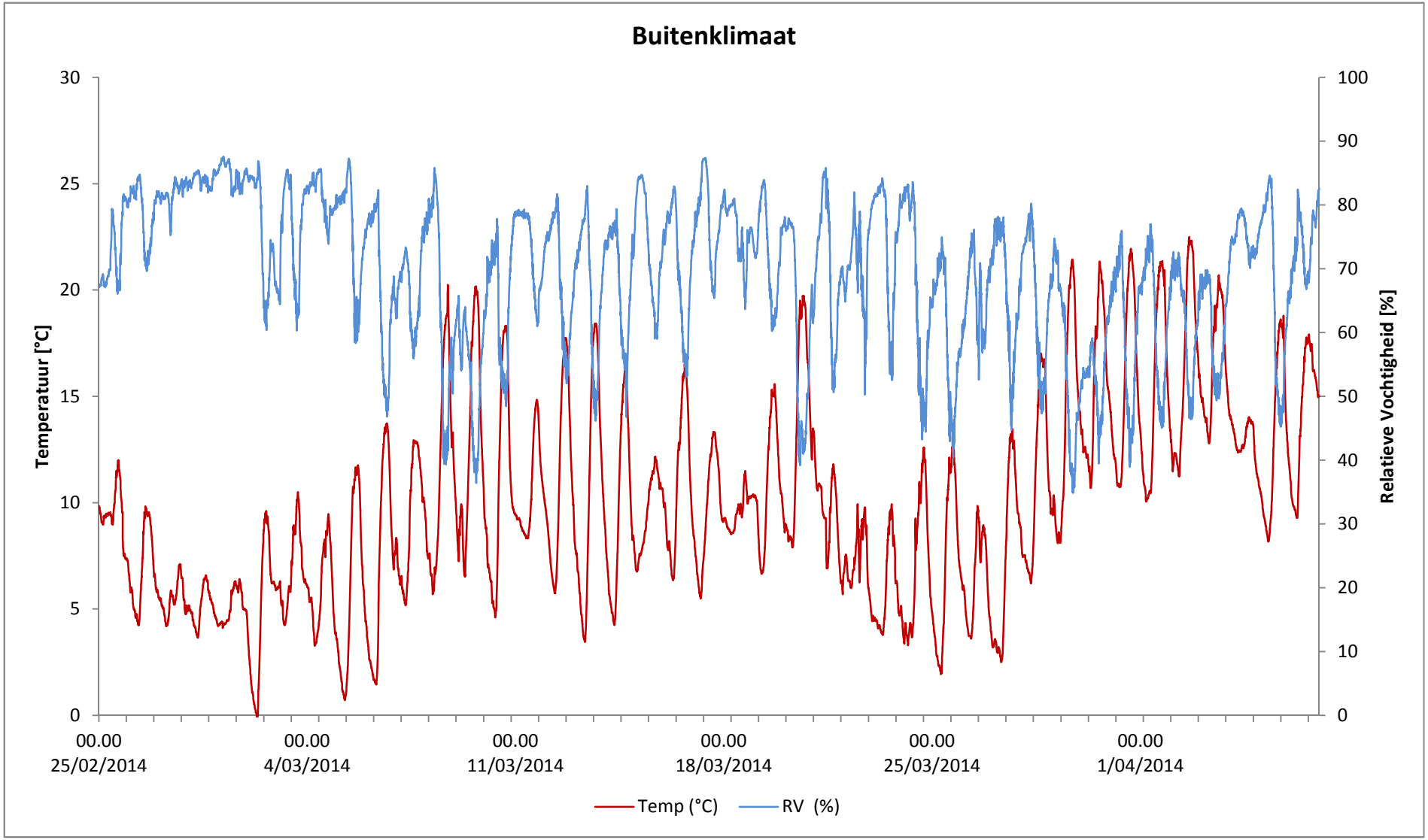
datum 11/2011. Vermeldingen in de actuele uitgave zijn van kracht. Vergissingen voorbehouden.

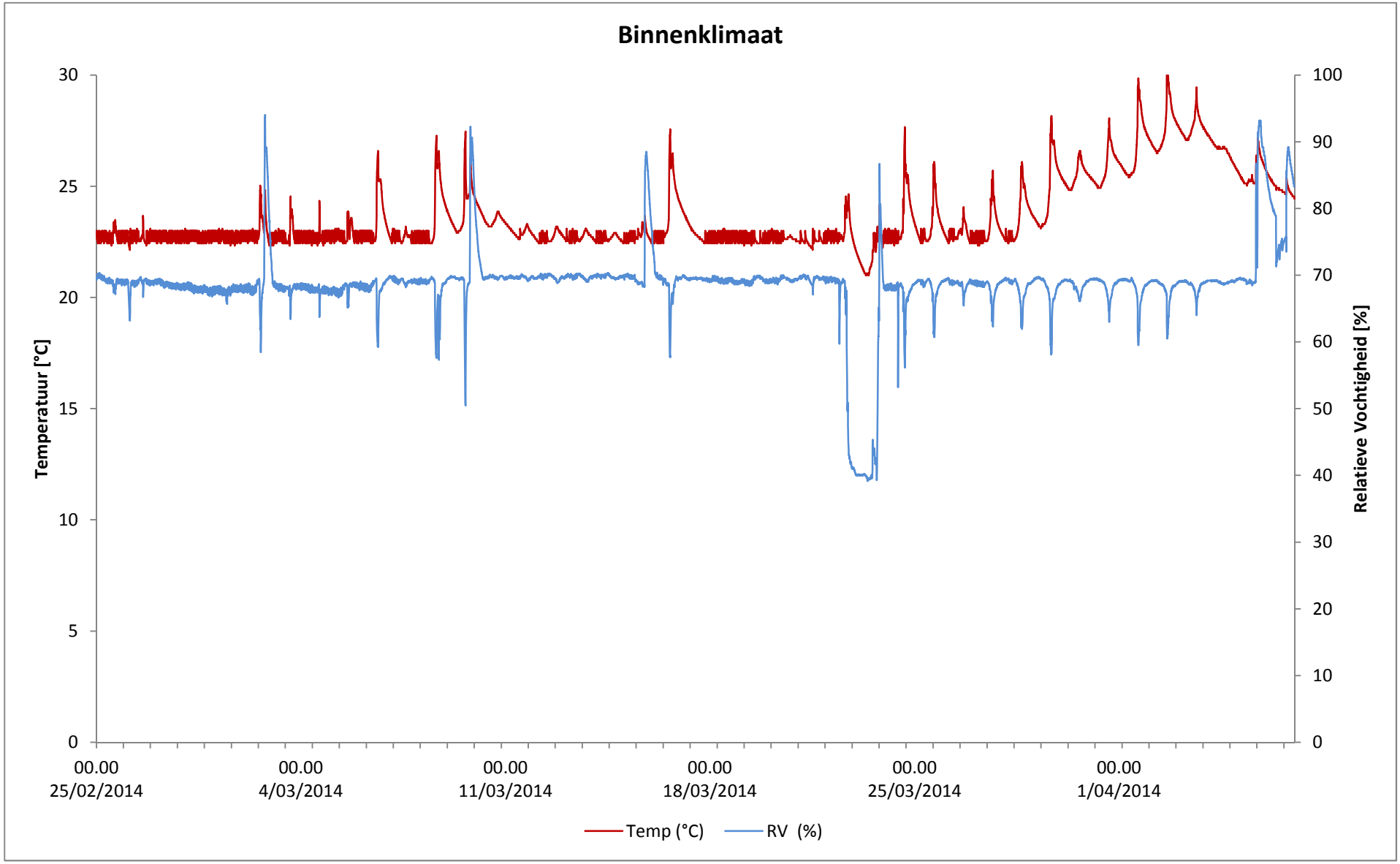
STEICO
natuurlijk beter isoleren

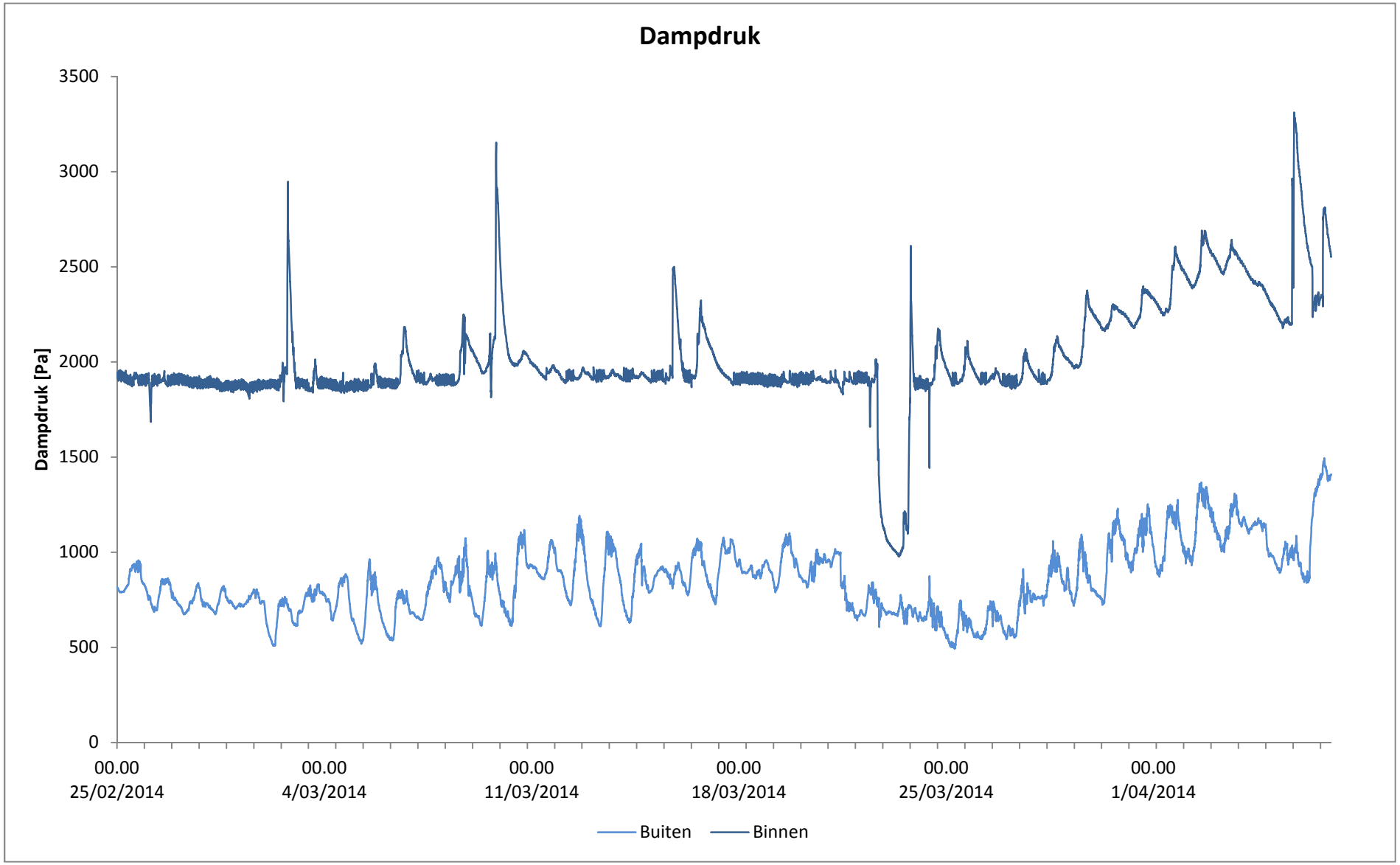
Uw STEICO vakhandel
eurabo® natuurlijk!
eurabo cvba
Beekstraat 32, 9600 Ronse
tel. +32(0)55 23 51 40
www.eurabo.be - info@eurabo.be
www.steico.com

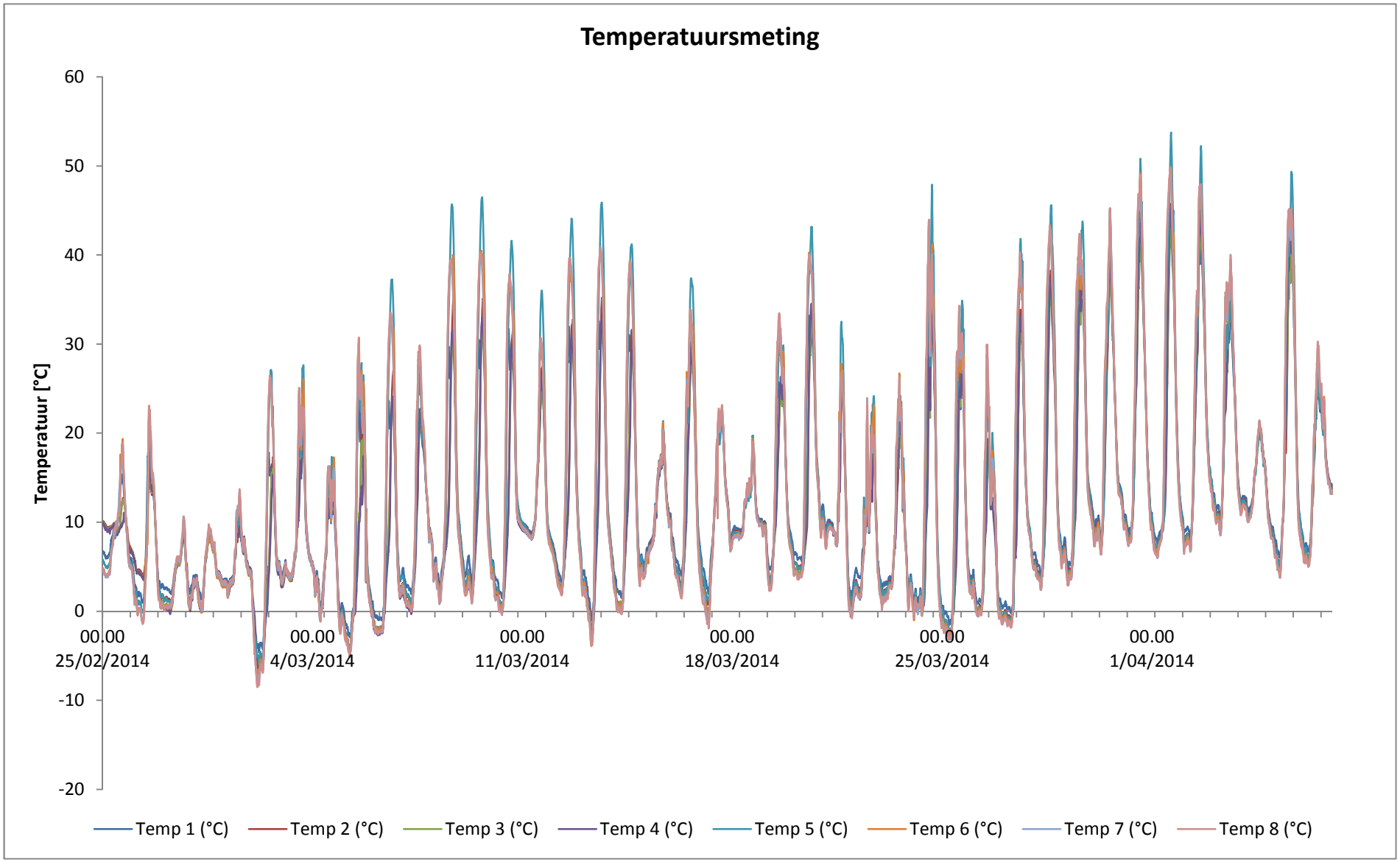
Bijlage C

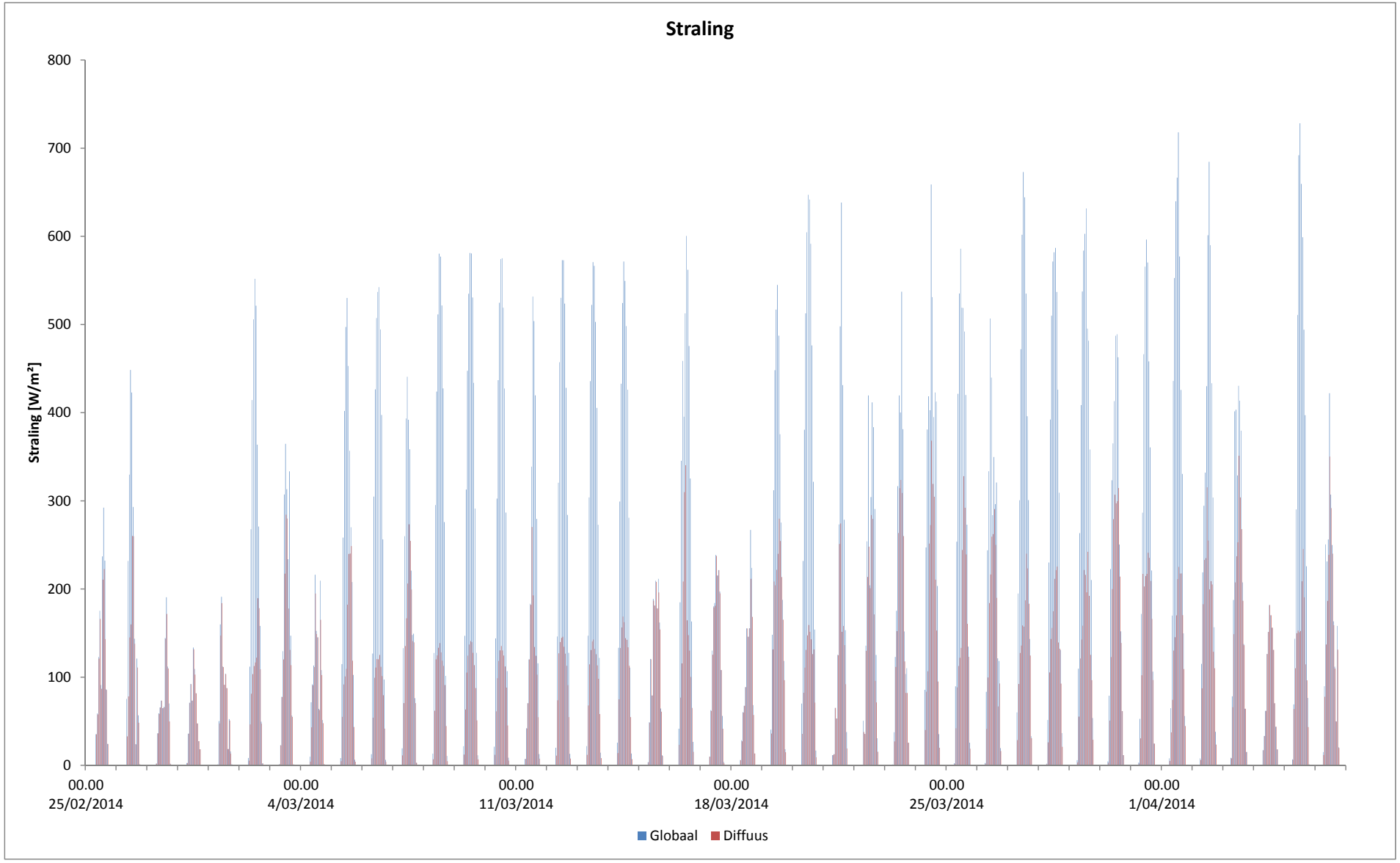
Metingen compact dak te Ronse

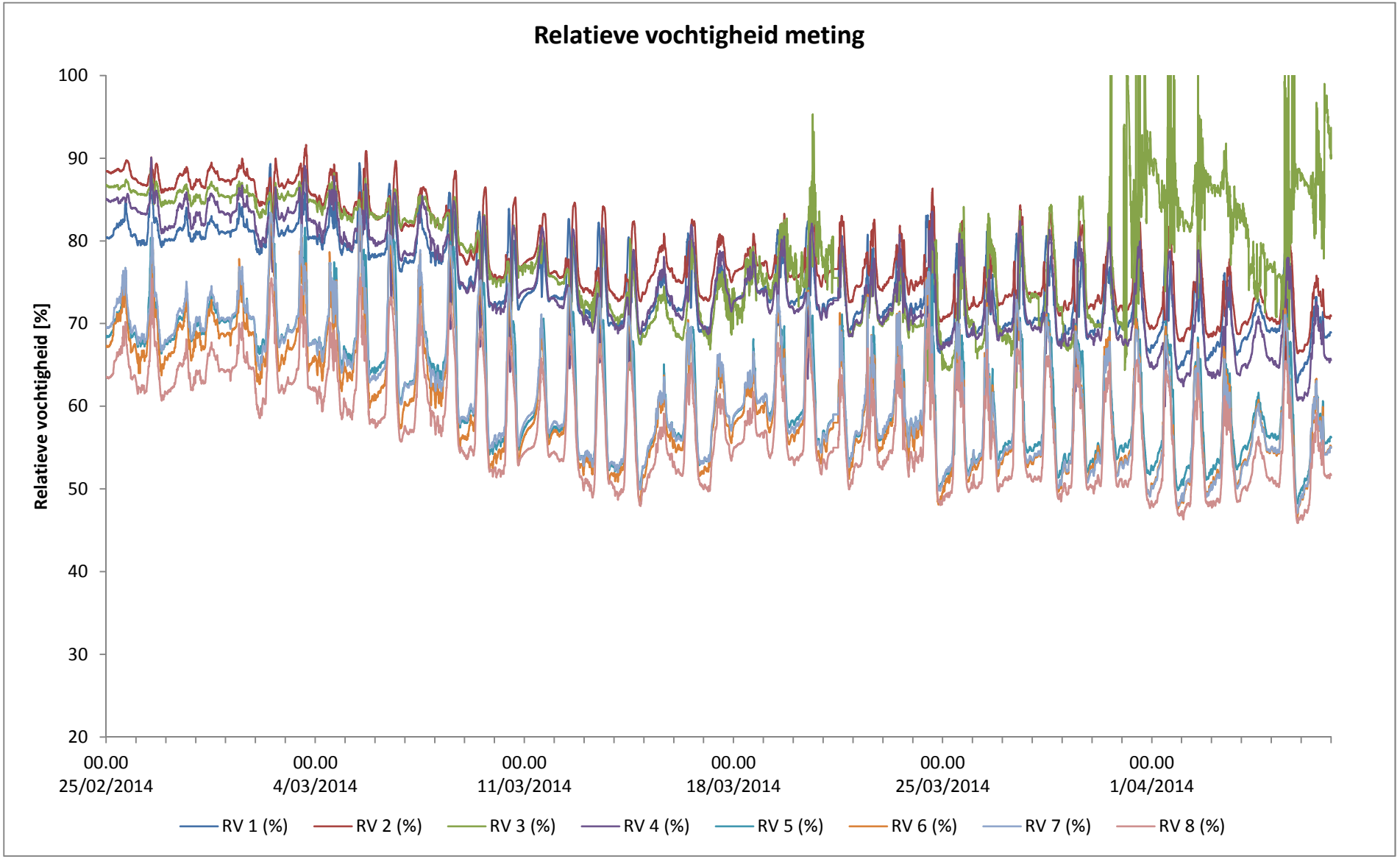

Buitenklimaat
Temperatuur [°C]
Relatieve Vochtigheid [%]
30
25
20
15
10
5
0
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
00.00 25/02/2014
00.00 4/03/2014
00.00 11/03/2014
00.00 18/03/2014
00.00 25/03/2014
00.00 1/04/2014
Temp (°C)
RV (%)

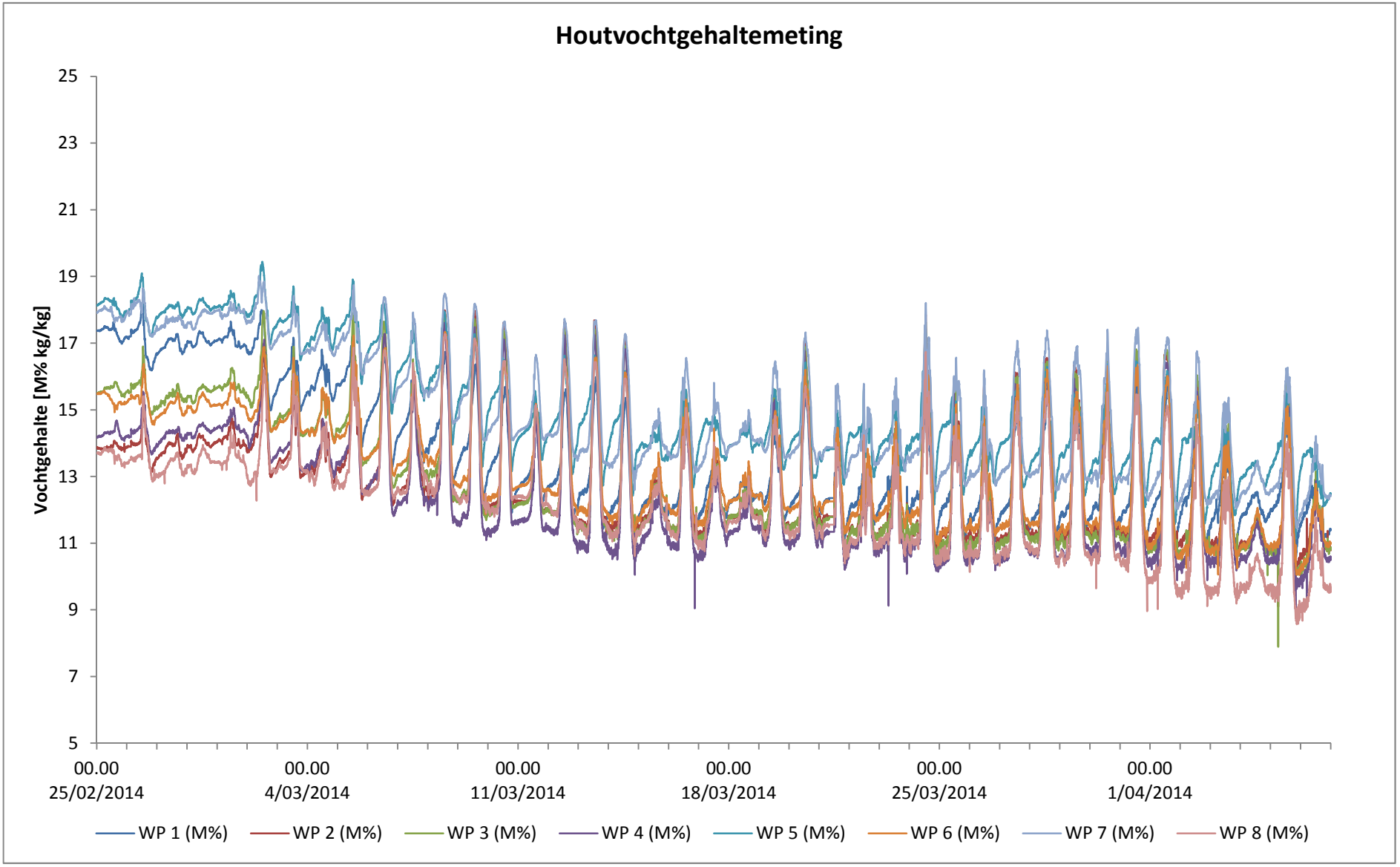

Binnenklimaat
Temperatuur [°C]
Relatieve Vochtigheid [%]
30
25
20
15
10
5
0
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
00.00
25/02/2014
00.00
4/03/2014
00.00
11/03/2014
00.00
18/03/2014
00.00
25/03/2014
00.00
1/04/2014
Temp (°C)
RV (%)

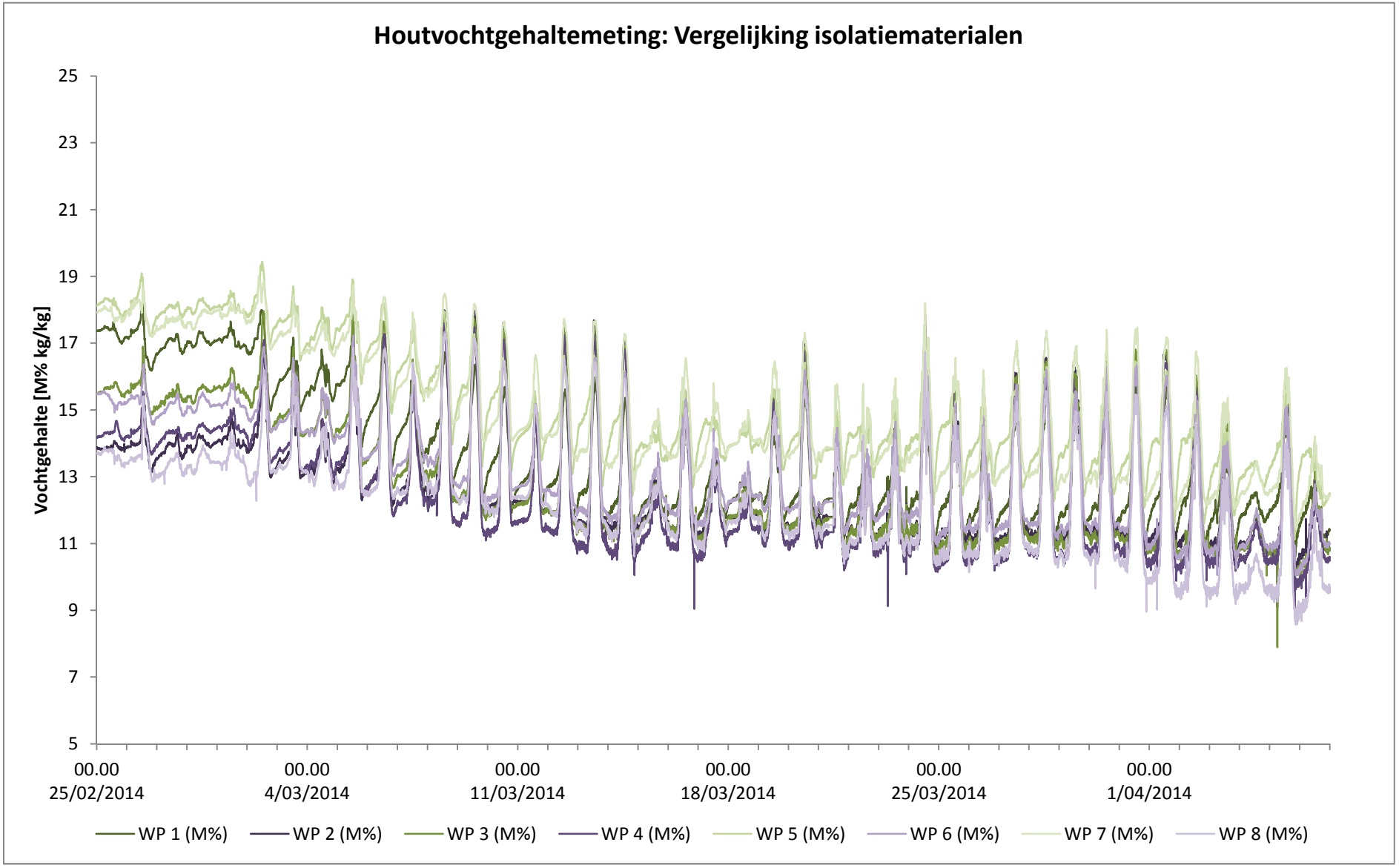

Dampdruk
Dampdruk [Pa]
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
00.00
25/02/2014
00.00
4/03/2014
00.00
11/03/2014
00.00
18/03/2014
00.00
25/03/2014
00.00
1/04/2014
Buiten
Binnen

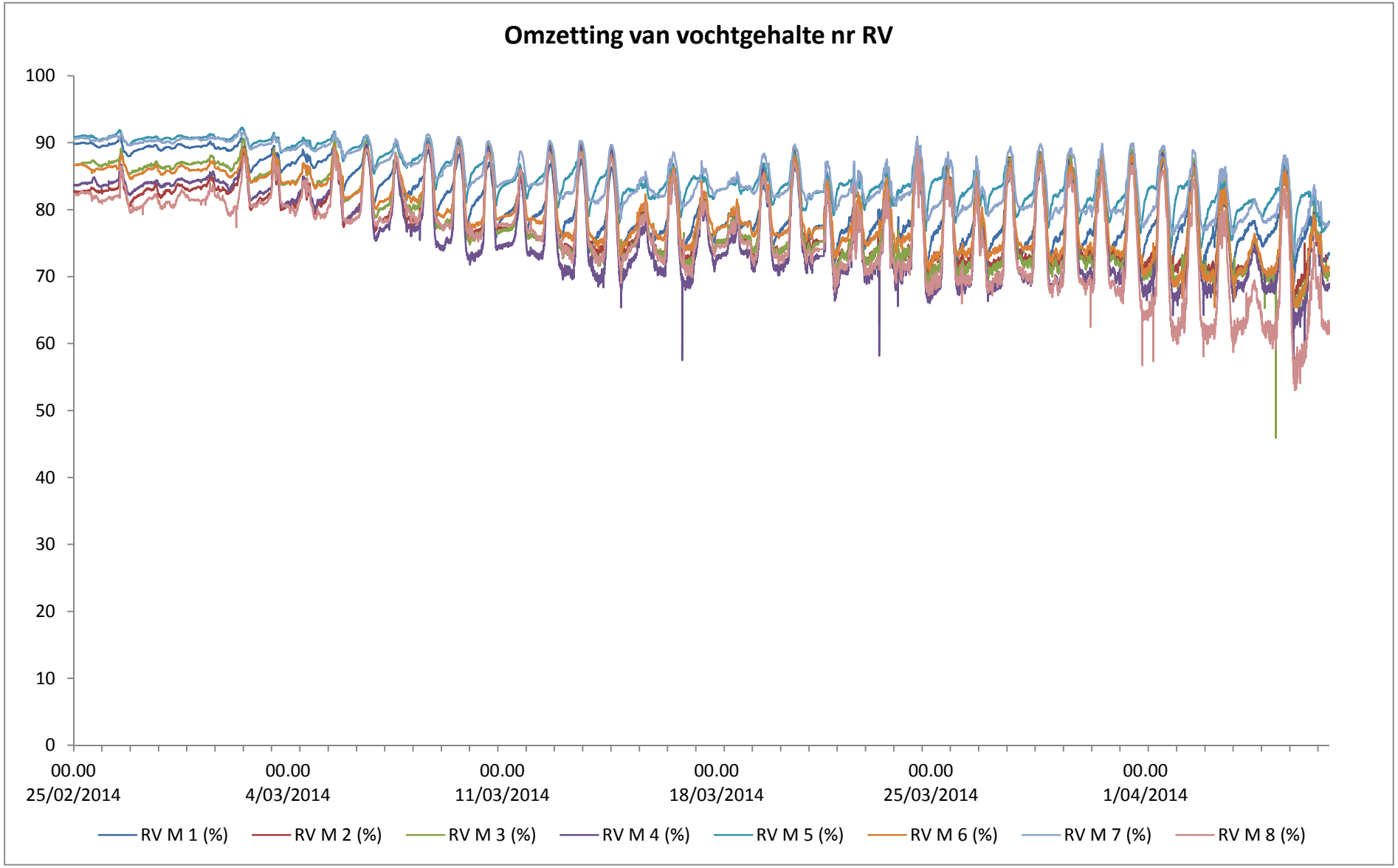

Temperatuursmeting
Temperatuur [°C]
60
50
40
30
20
10
0
-10
-20
00.00
25/02/2014
00.00
4/03/2014
00.00
11/03/2014
00.00
18/03/2014
00.00
25/03/2014
00.00
1/04/2014
Temp 1 (°C)
Temp 2 (°C)
Temp 3 (°C)
Temp 4 (°C)
Temp 5 (°C)
Temp 6 (°C)
Temp 7 (°C)
Temp 8 (°C)

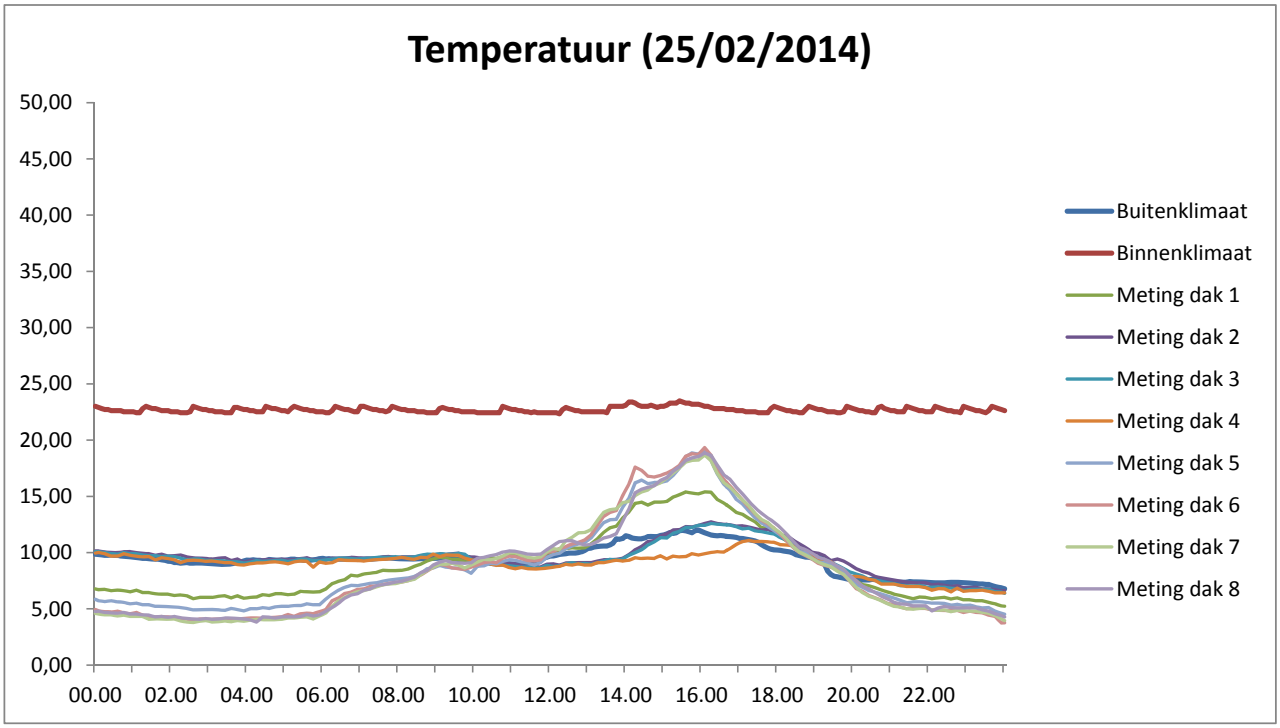

Straling
Straling [W/m²]
800
700
600
500
400
300
200
100
0
00.00
25/02/2014
00.00
4/03/2014
00.00
11/03/2014
00.00
18/03/2014
00.00
25/03/2014
00.00
1/04/2014
Globaal
Diffuus

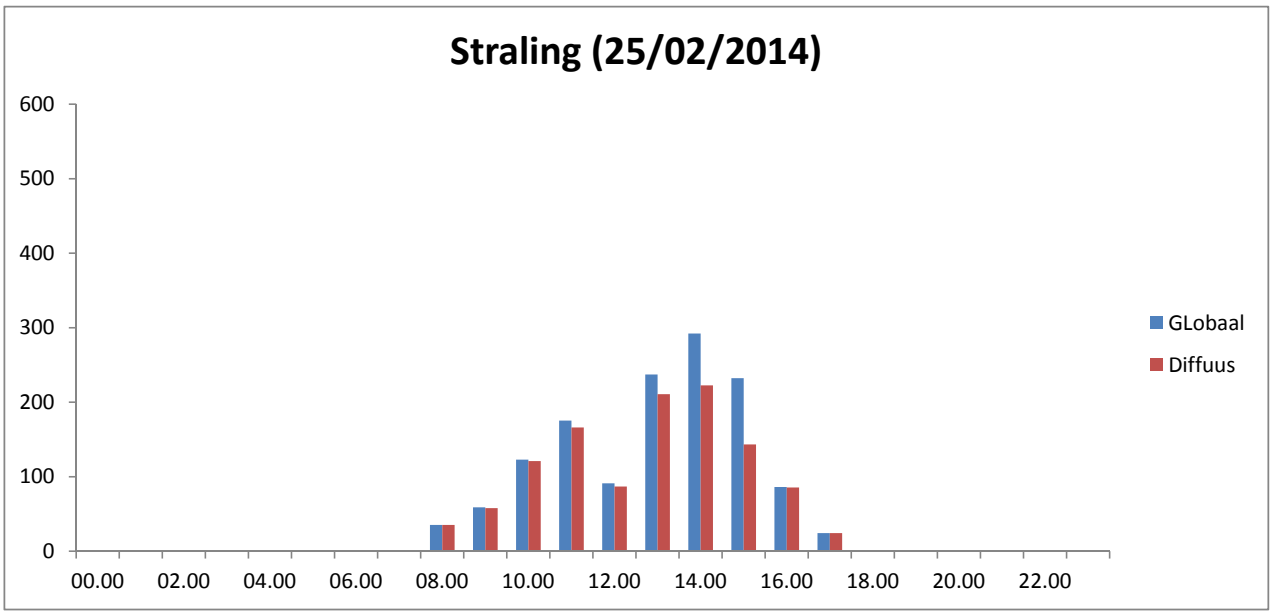

Relatieve vochtigheid meting
Relatieve vochtigheid [%]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
00.00
25/02/2014
00.00
4/03/2014
00.00
11/03/2014
00.00
18/03/2014
00.00
25/03/2014
00.00
1/04/2014
RV 1 (%)
RV 2 (%)
RV 3 (%)
RV 4 (%)
RV 5 (%)
RV 6 (%)
RV 7 (%)
RV 8 (%)

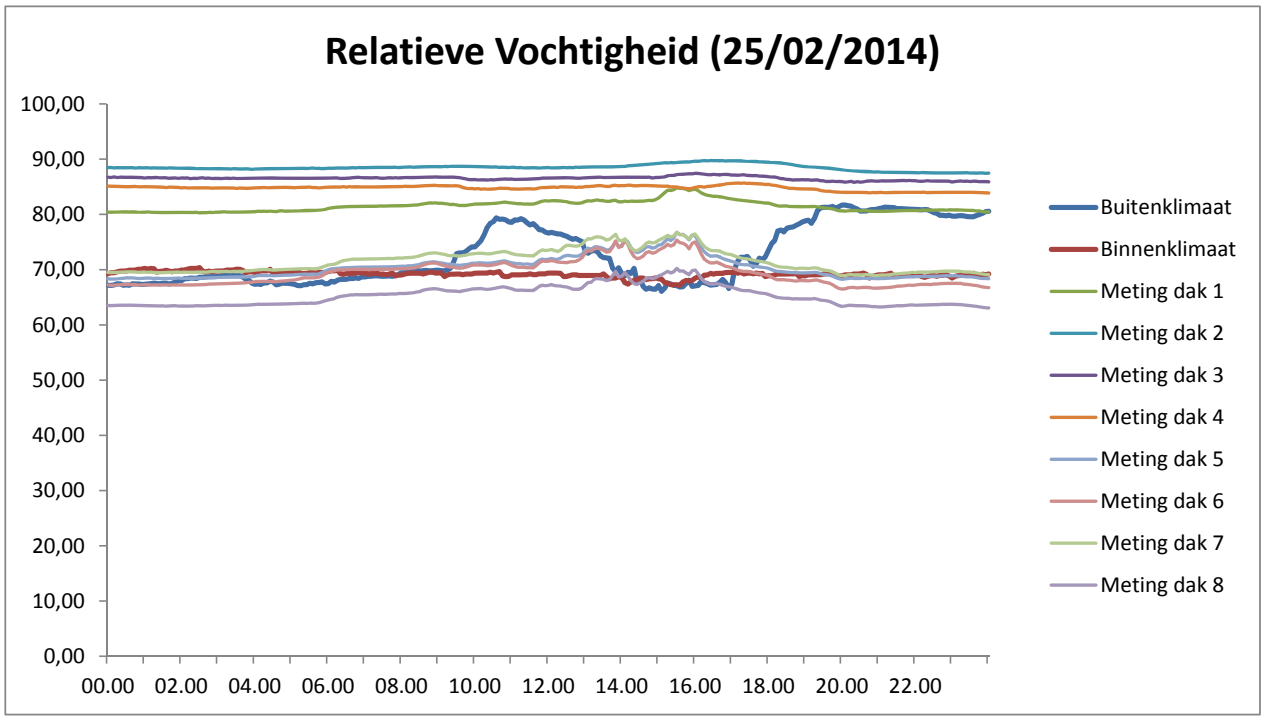

Houtvochtgehaltemeting
Vochtgehalte [M% kg/kg]
25
23
21
19
17
15
13
11
9
7
5
00.00 25/02/2014
00.00 4/03/2014
00.00 11/03/2014
00.00 18/03/2014
00.00 25/03/2014
00.00 1/04/2014
WP 1 (M%)
WP 2 (M%)
WP 3 (M%)
WP 4 (M%)
WP 5 (M%)
WP 6 (M%)
WP 7 (M%)
WP 8 (M%)

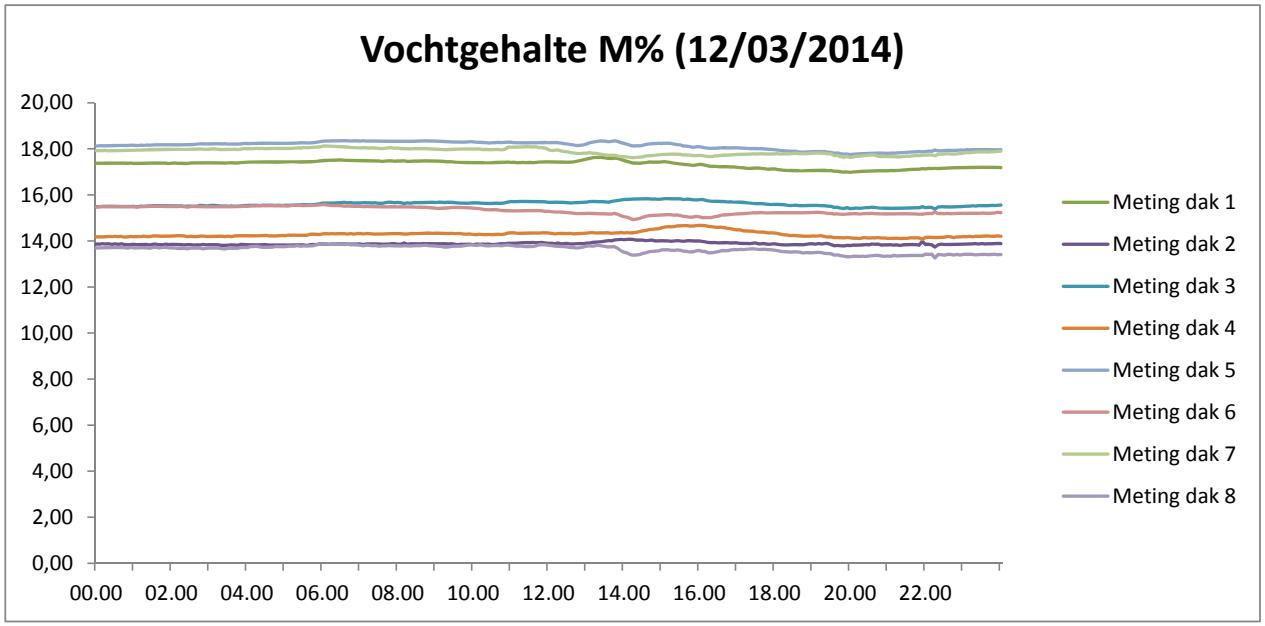

Houtvochtgehaltemeting: Vergelijking isolatiematerialen
Vochtgehalte [M% kg/kg]
25
23
21
19
17
15
13
11
9
7
5
00.00 25/02/2014
00.00 4/03/2014
00.00 11/03/2014
00.00 18/03/2014
00.00 25/03/2014
00.00 1/04/2014
WP 1 (M%)
WP 2 (M%)
WP 3 (M%)
WP 4 (M%)
WP 5 (M%)
WP 6 (M%)
WP 7 (M%)
WP 8 (M%)

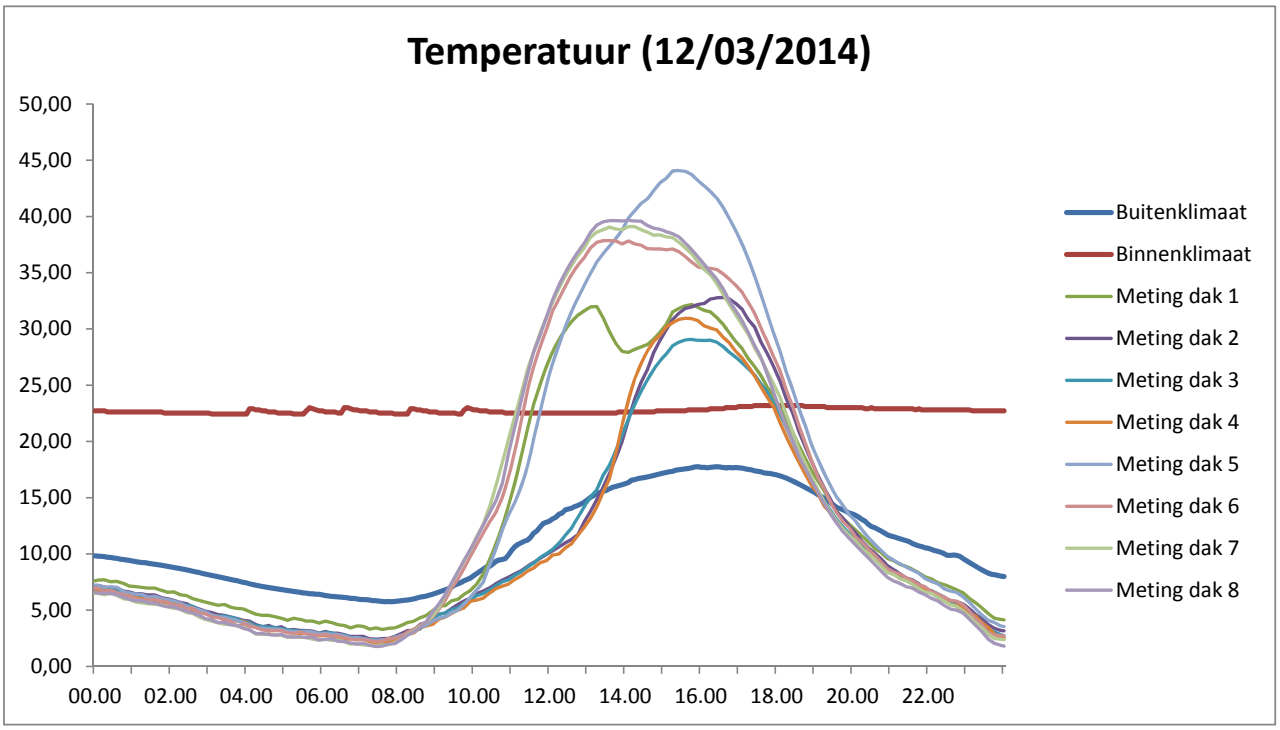

Omzetting van vochtgehalte nr RV
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
00.00 25/02/2014
00.00 4/03/2014
00.00 11/03/2014
00.00 18/03/2014
00.00 25/03/2014
00.00 1/04/2014
RV M 1 (%)
RV M 2 (%)
RV M 3 (%)
RV M 4 (%)
RV M 5 (%)
RV M 6 (%)
RV M 7 (%)
RV M 8 (%)

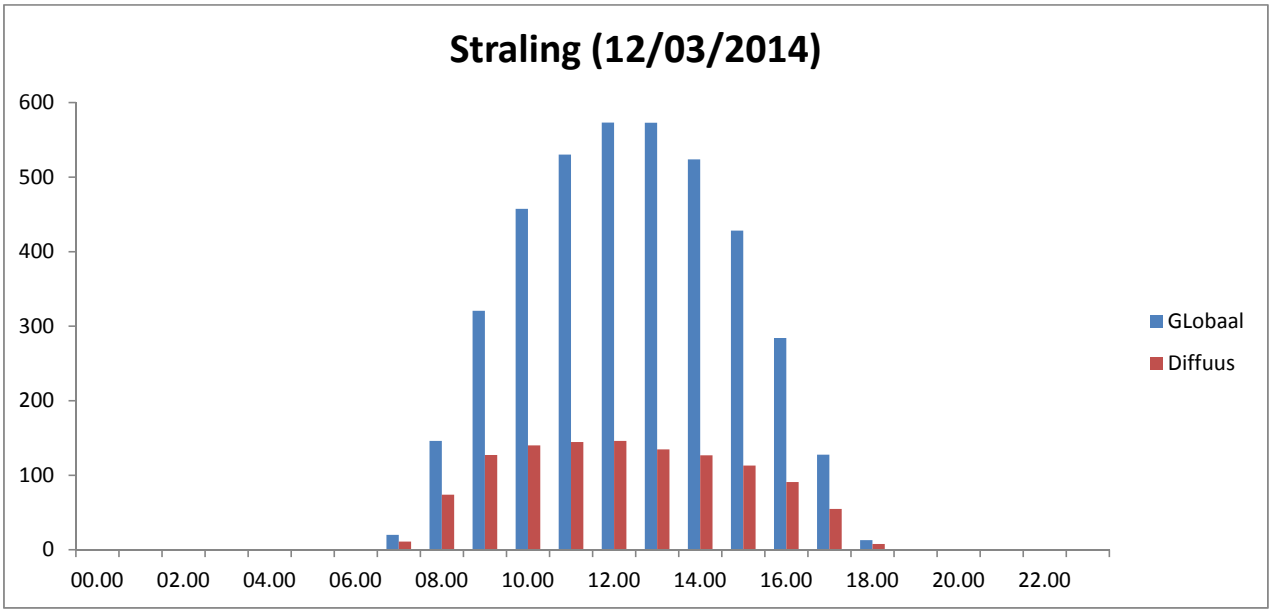

Temperatuur (25/02/2014)
50,00
45,00
40,00
35,00
30,00
25,00
20,00
15,00
10,00
5,00
0,00
00.00
02.00
04.00
06.00
08.00
10.00
12.00
14.00
16.00
18.00
20.00
22.00
Buitenklimaat
Binnenklimaat
Meting dak 1
Meting dak 2
Meting dak 3
Meting dak 4
Meting dak 5
Meting dak 6
Meting dak 7
Meting dak 8

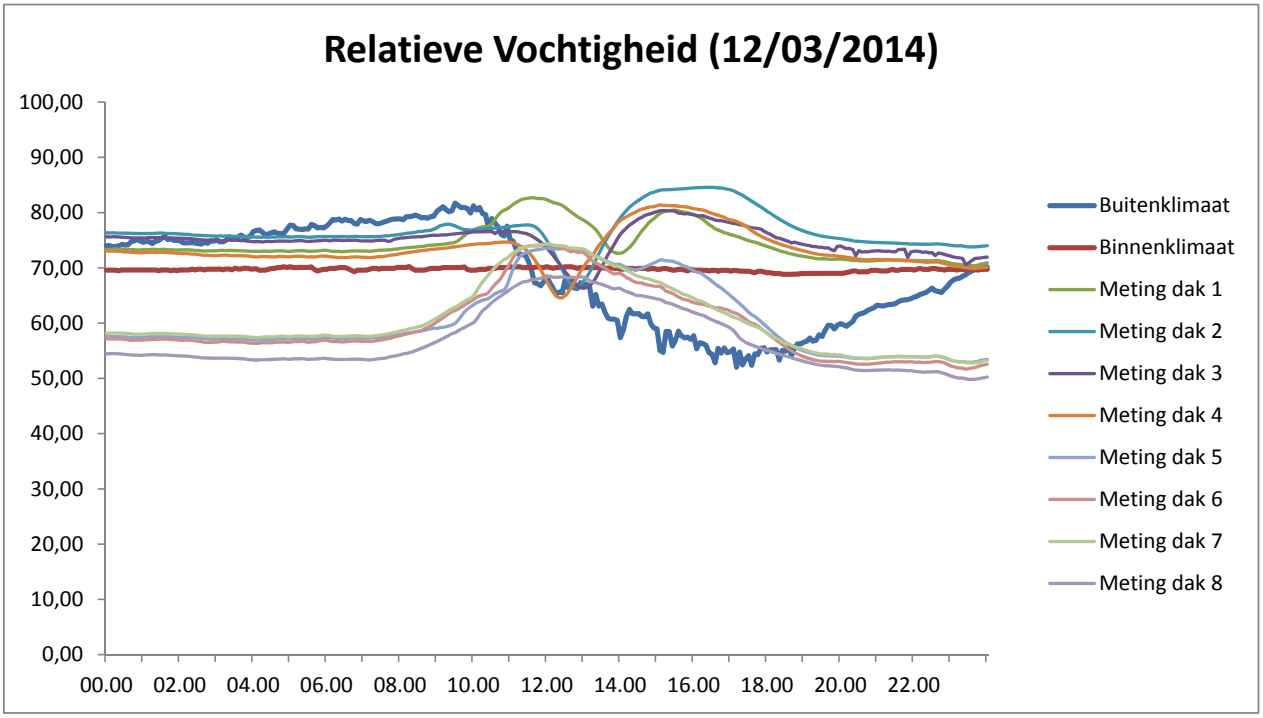

Straling (25/02/2014)
600
500
400
300
200
100
0
00.00
02.00
04.00
06.00
08.00
10.00
12.00
14.00
16.00
18.00
20.00
22.00
GLobaal
Diffuus

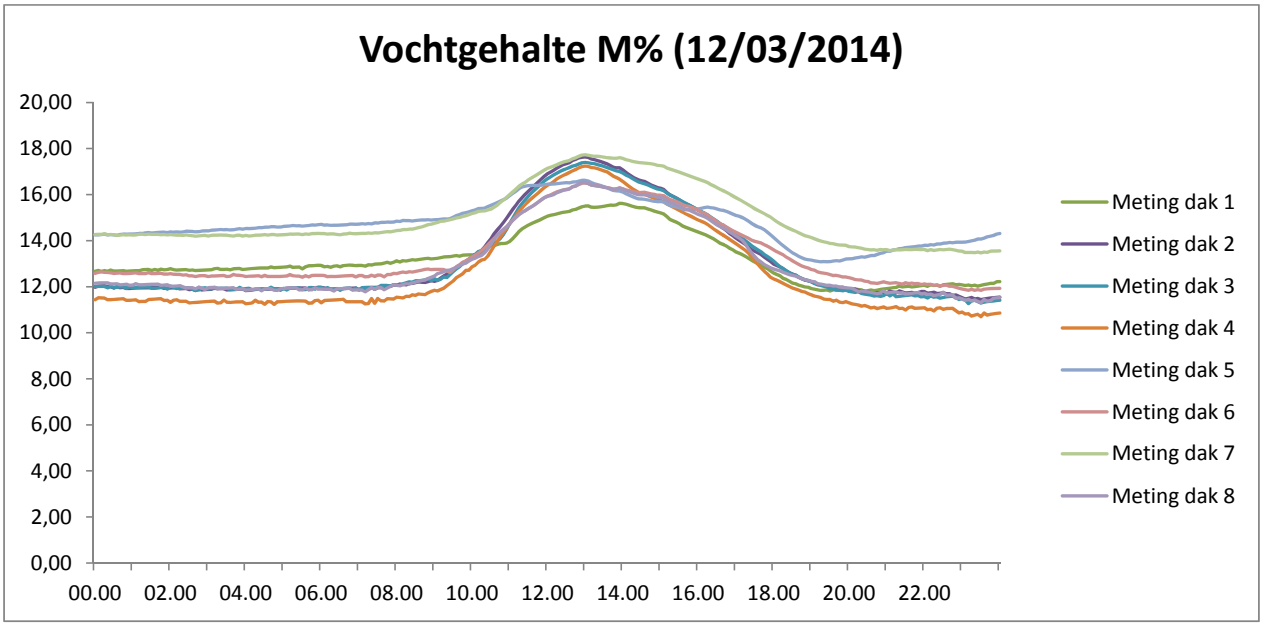

Relatieve Vochtigheid (25/02/2014)
100,00
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
00.00
02.00
04.00
06.00
08.00
10.00
12.00
14.00
16.00
18.00
20.00
22.00
Buitenklimaat
Binnenklimaat
Meting dak 1
Meting dak 2
Meting dak 3
Meting dak 4
Meting dak 5
Meting dak 6
Meting dak 7
Meting dak 8

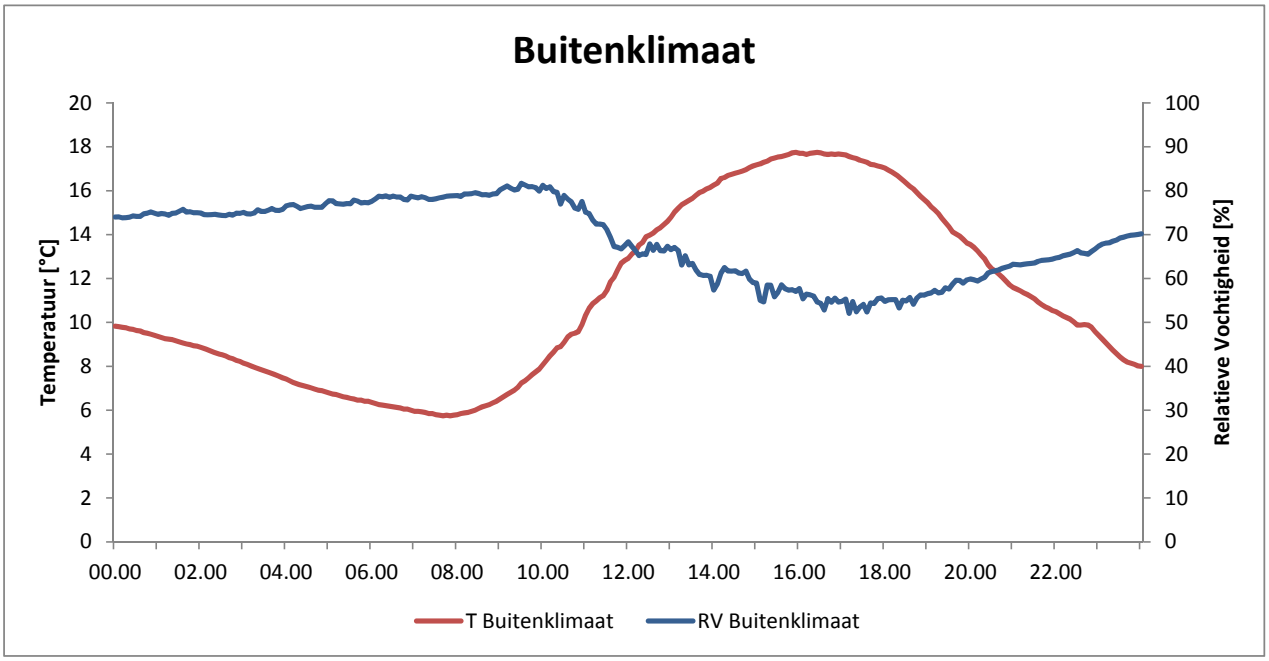

Vochtgehalte M% (12/03/2014)
20,00
18,00
16,00
14,00
12,00
10,00
8,00
6,00
4,00
2,00
0,00
00.00
02.00
04.00
06.00
08.00
10.00
12.00
14.00
16.00
18.00
20.00
22.00
Meting dak 1
Meting dak 2
Meting dak 3
Meting dak 4
Meting dak 5
Meting dak 6
Meting dak 7
Meting dak 8

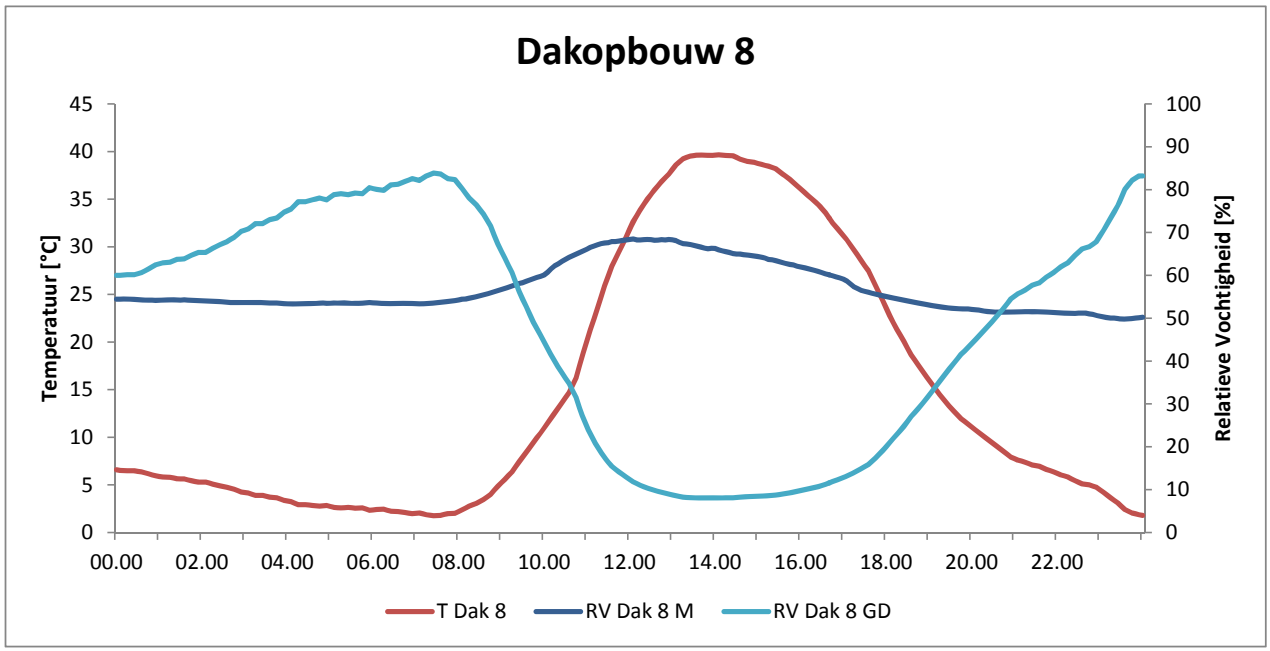

Temperatuur (12/03/2014)
50,00
45,00
40,00
35,00
30,00
25,00
20,00
15,00
10,00
5,00
0,00
00.00
02.00
04.00
06.00
08.00
10.00
12.00
14.00
16.00
18.00
20.00
22.00
Buitenklimaat
Binnenklimaat
Meting dak 1
Meting dak 2
Meting dak 3
Meting dak 4
Meting dak 5
Meting dak 6
Meting dak 7
Meting dak 8

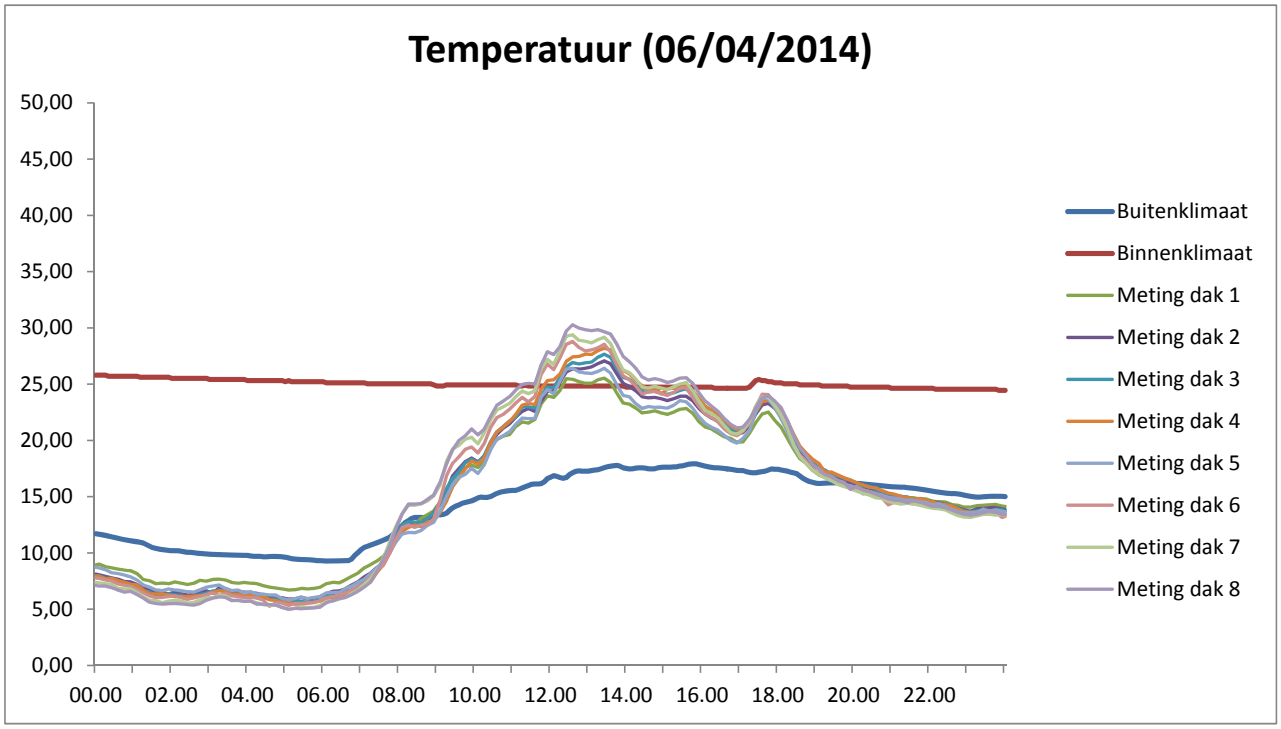

Straling (12/03/2014)
600
500
400
300
200
100
0
00.00
02.00
04.00
06.00
08.00
10.00
12.00
14.00
16.00
18.00
20.00
22.00
GLobaal
Diffuus

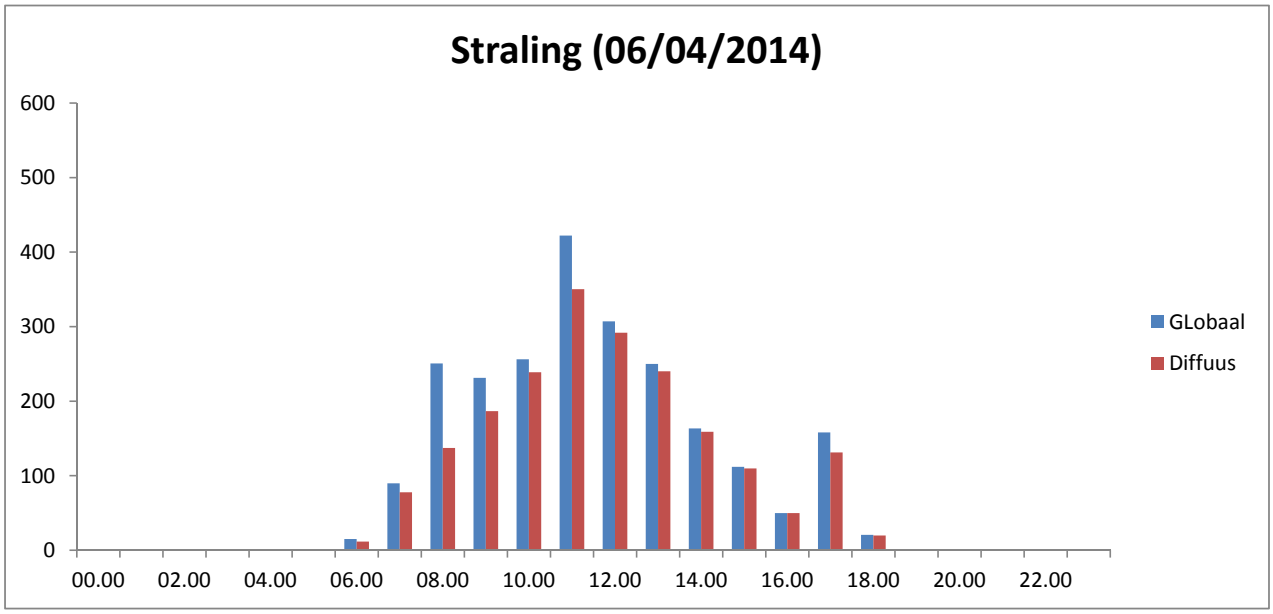

Relatieve Vochtigheid (12/03/2014)
100,00
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
00.00
02.00
04.00
06.00
08.00
10.00
12.00
14.00
16.00
18.00
20.00
22.00
Buitenklimaat
Binnenklimaat
Meting dak 1
Meting dak 2
Meting dak 3
Meting dak 4
Meting dak 5
Meting dak 6
Meting dak 7
Meting dak 8

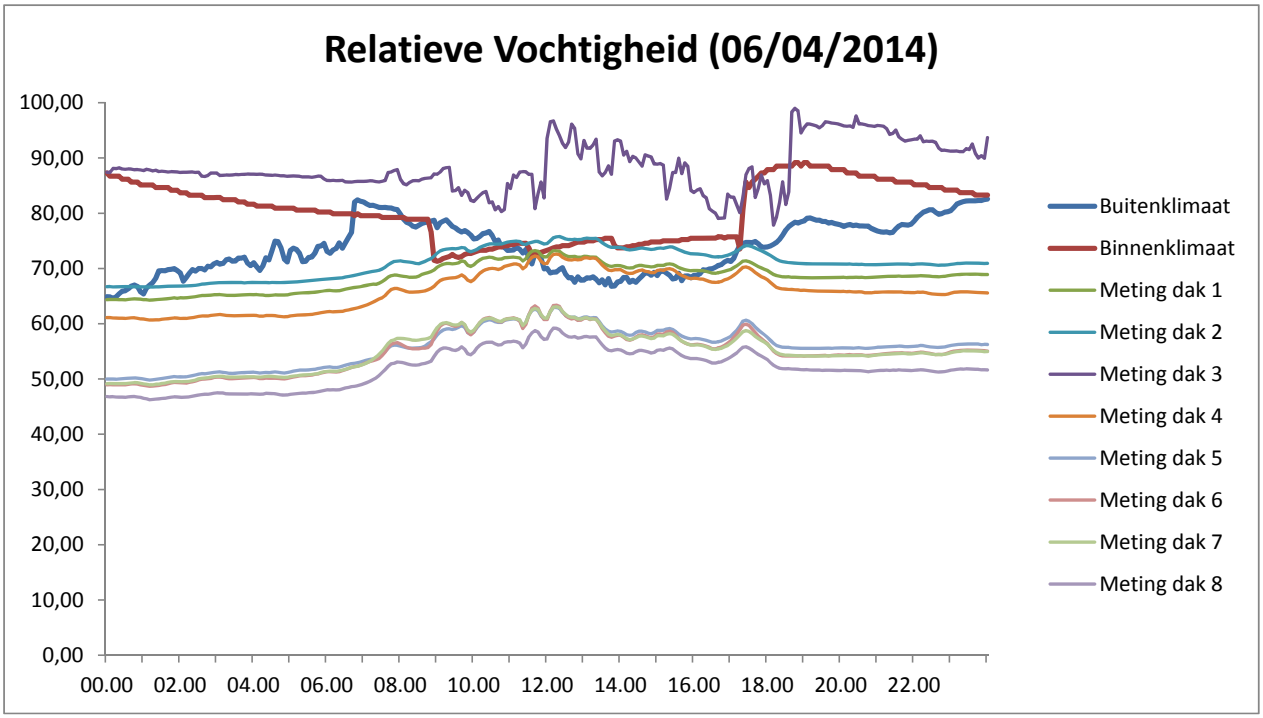

Vochtgehalte M% (12/03/2014)
20,00
18,00
16,00
14,00
12,00
10,00
8,00
6,00
4,00
2,00
0,00
00.00
02.00
04.00
06.00
08.00
10.00
12.00
14.00
16.00
18.00
20.00
22.00
Meting dak 1
Meting dak 2
Meting dak 3
Meting dak 4
Meting dak 5
Meting dak 6
Meting dak 7
Meting dak 8

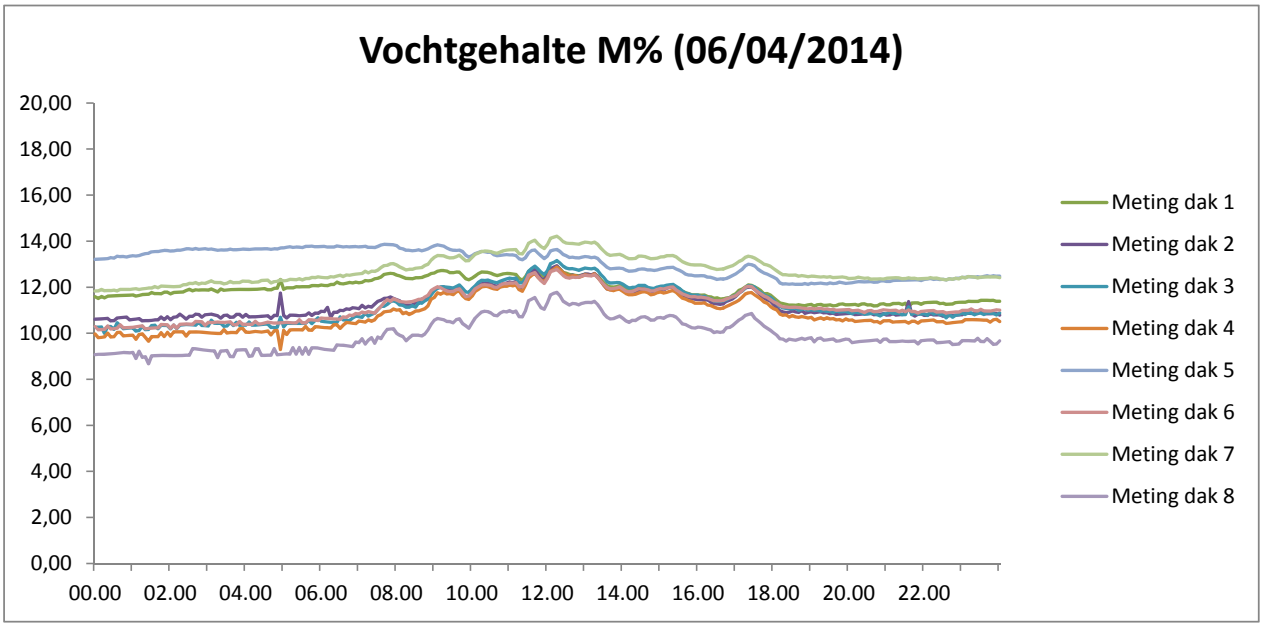

Buitenklimaat
Temperatuur [°C]
Relatieve Vochtigheid [%]
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
00.00
02.00
04.00
06.00
08.00
10.00
12.00
14.00
16.00
18.00
20.00
22.00
T Buitenklimaat
RV Buitenklimaat


Dakopbouw 8
Temperatuur [°C]
Relatieve Vochtigheid [%]
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
00.00
02.00
04.00
06.00
08.00
10.00
12.00
14.00
16.00
18.00
20.00
22.00
T Dak 8
RV Dak 8 M
RV Dak 8 GD


Temperatuur (06/04/2014)
50,00
45,00
40,00
35,00
30,00
25,00
20,00
15,00
10,00
5,00
0,00
00.00
02.00
04.00
06.00
08.00
10.00
12.00
14.00
16.00
18.00
20.00
22.00
Buitenklimaat
Binnenklimaat
Meting dak 1
Meting dak 2
Meting dak 3
Meting dak 4
Meting dak 5
Meting dak 6
Meting dak 7
Meting dak 8


Straling (06/04/2014)
600
500
400
300
200
100
0
00.00
02.00
04.00
06.00
08.00
10.00
12.00
14.00
16.00
18.00
20.00
22.00
GLobaal
Diffuus

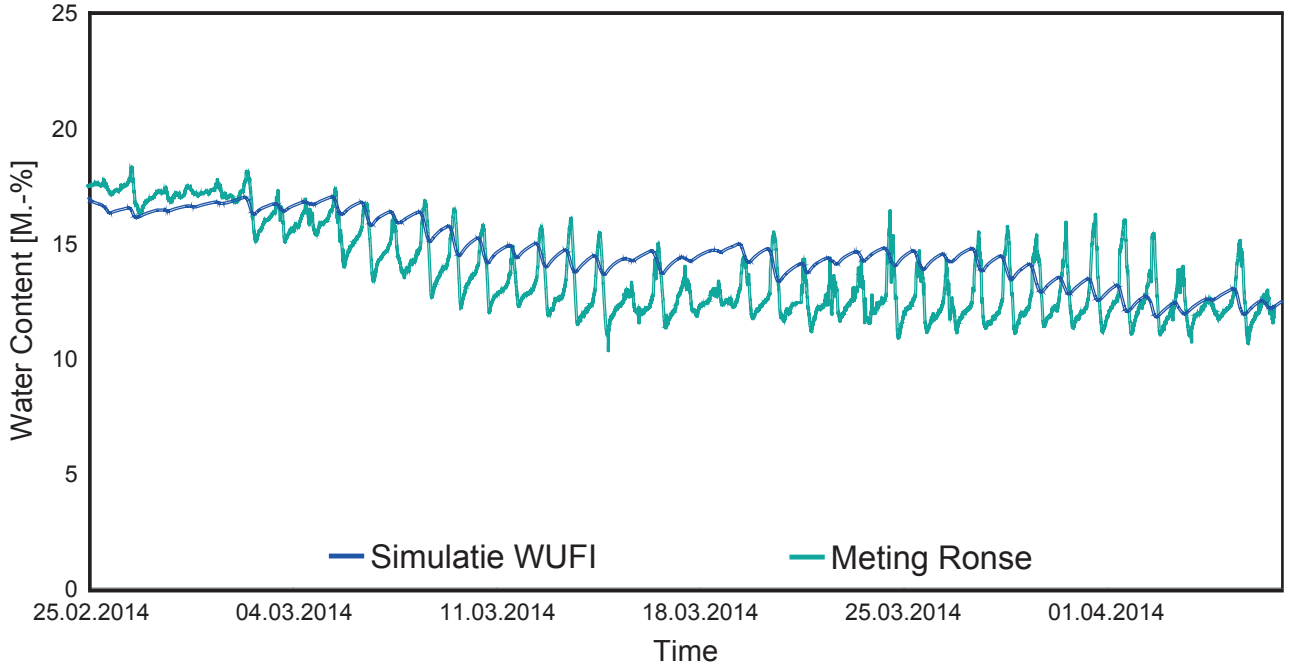

Relatieve Vochtigheid (06/04/2014)
100,00
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
00.00
02.00
04.00
06.00
08.00
10.00
12.00
14.00
16.00
18.00
20.00
22.00
Buitenklimaat
Binnenklimaat
Meting dak 1
Meting dak 2
Meting dak 3
Meting dak 4
Meting dak 5
Meting dak 6
Meting dak 7
Meting dak 8

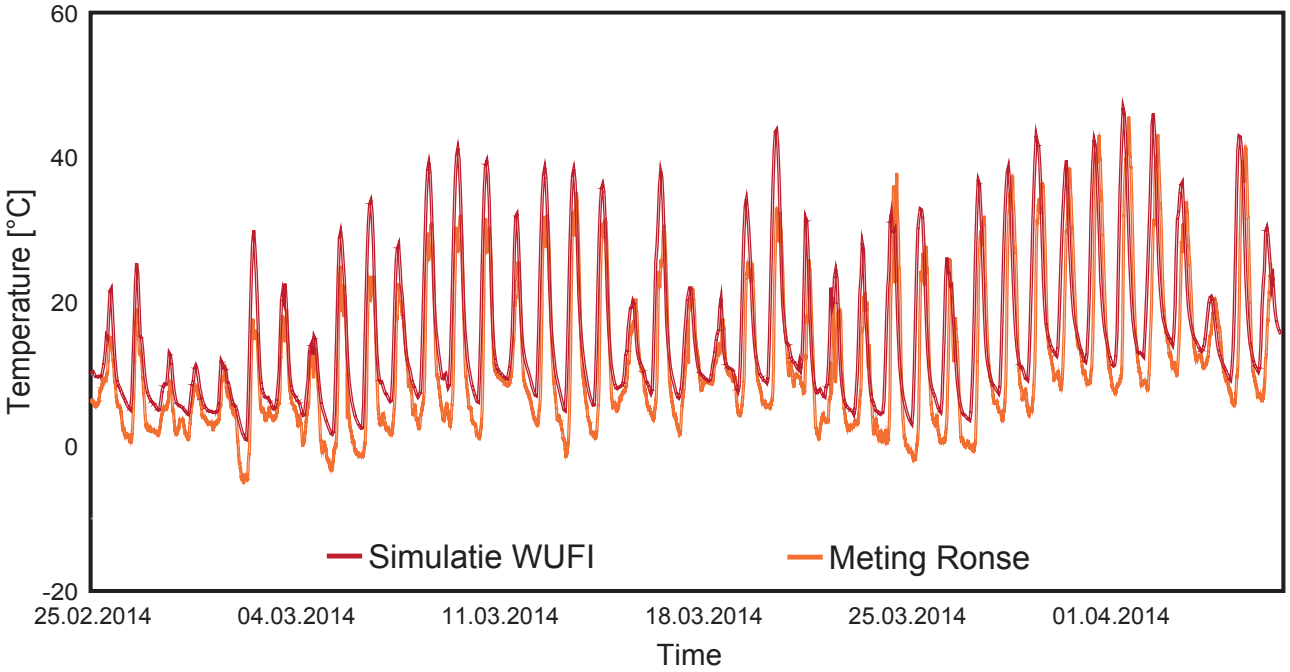

Vochtgehalte M% (06/04/2014)
20,00
18,00
16,00
14,00
12,00
10,00
8,00
6,00
4,00
2,00
0,00
00.00
02.00
04.00
06.00
08.00
10.00
12.00
14.00
16.00
18.00
20.00
22.00
Meting dak 1
Meting dak 2
Meting dak 3
Meting dak 4
Meting dak 5
Meting dak 6
Meting dak 7
Meting dak 8

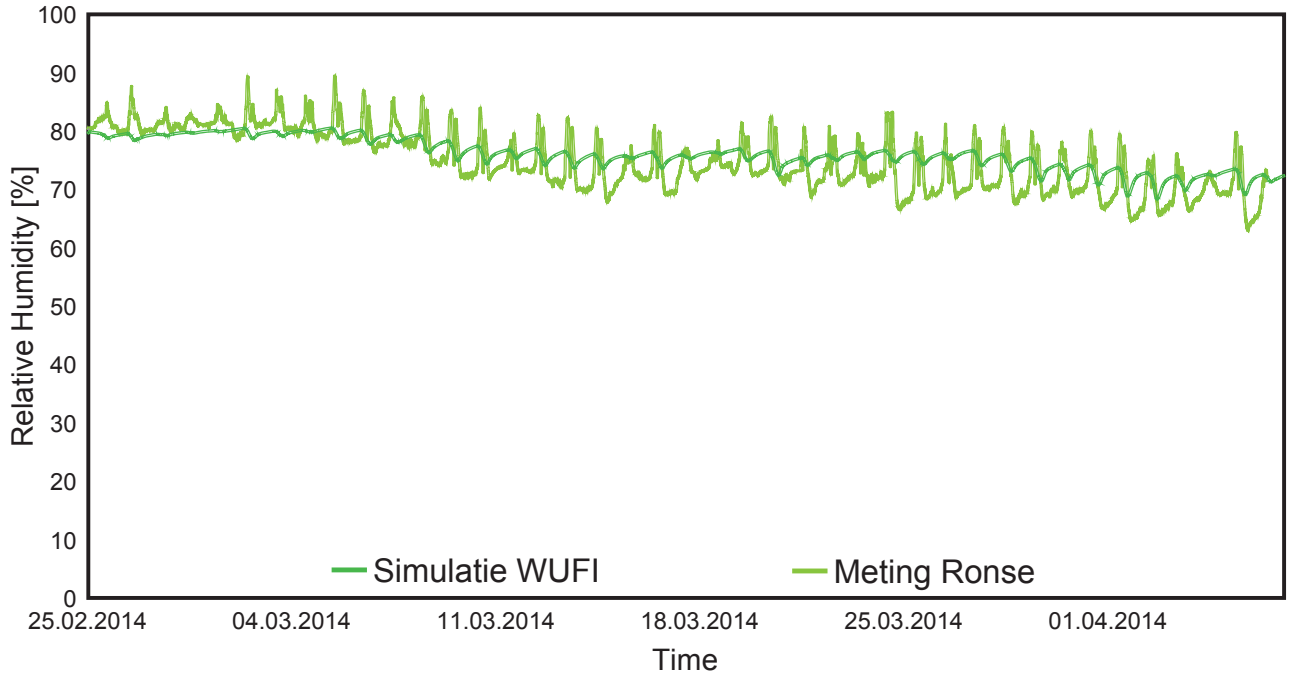
Bijlage D

Vergelijking metingen & simulatie WUFI

Meting ~ Simulatie Dakopbouw 1: DB+ Steico Zell

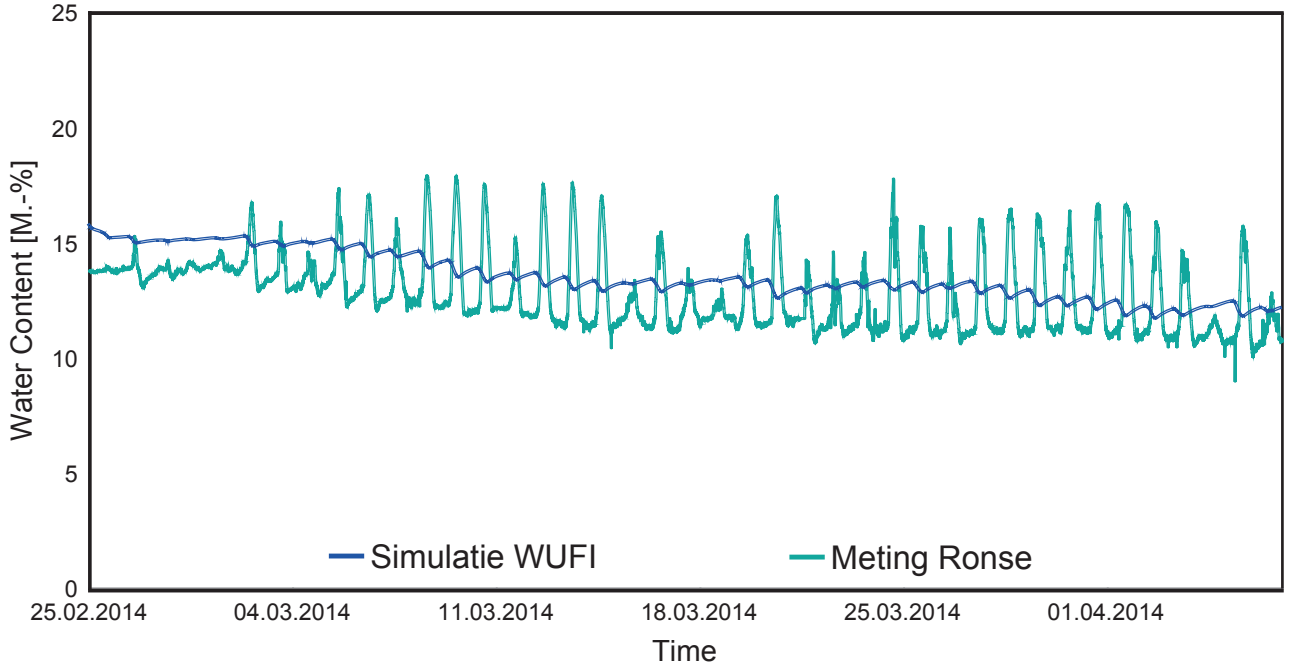


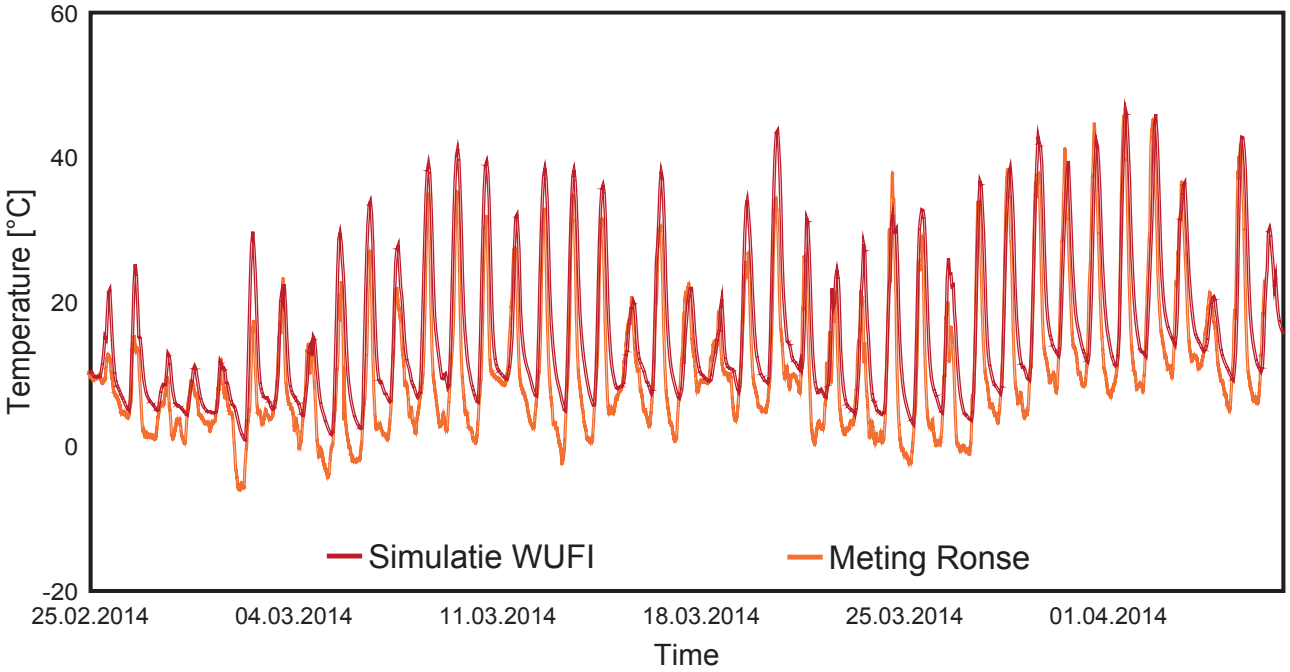


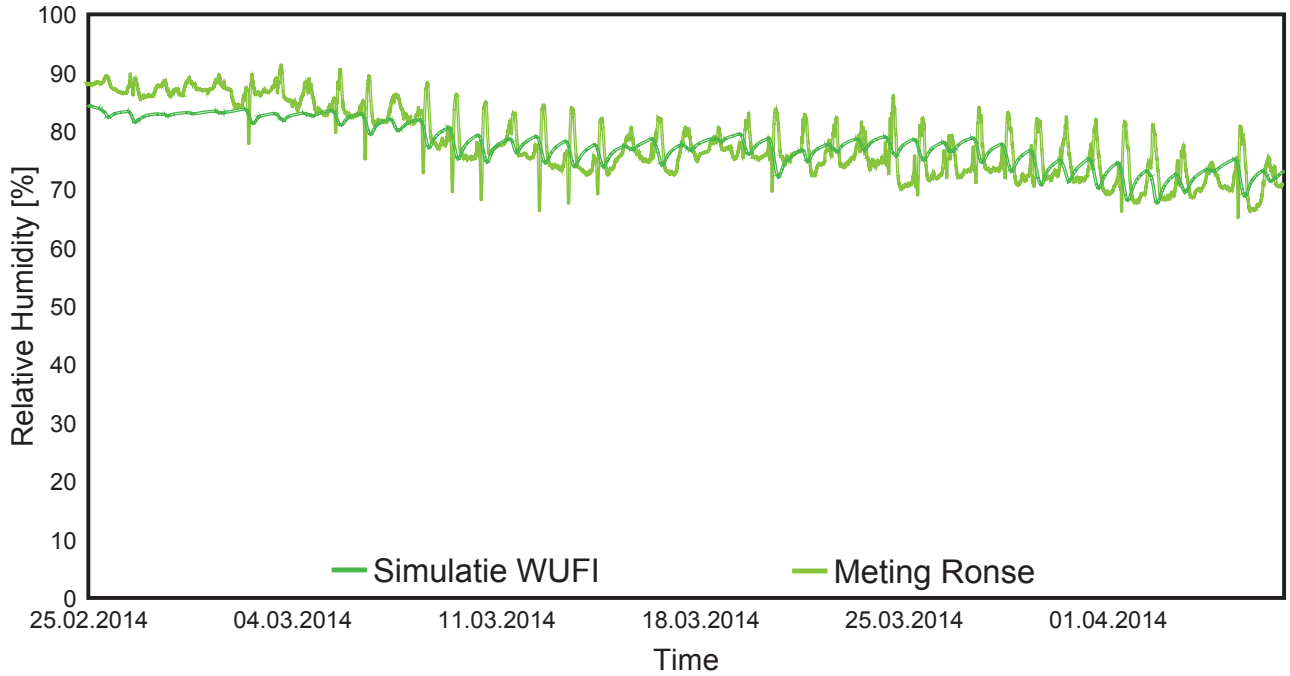


Meting ~ Simulatie

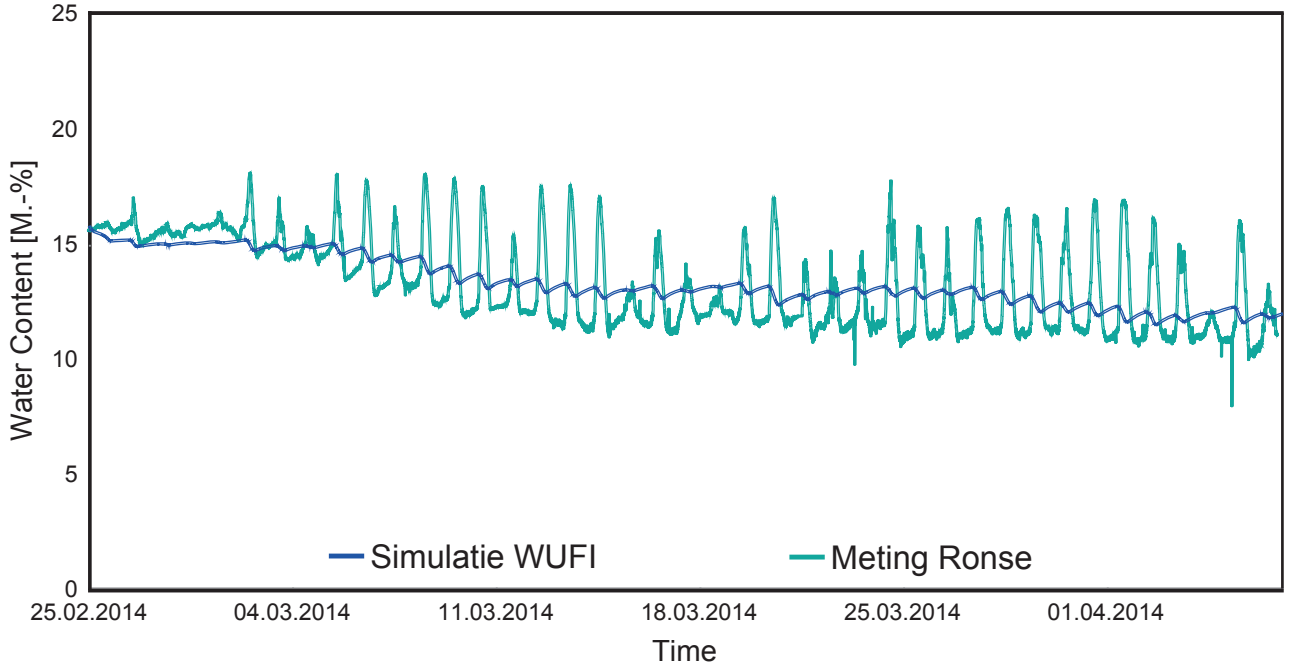
Dakopbouw 2: DB+ Isofloc

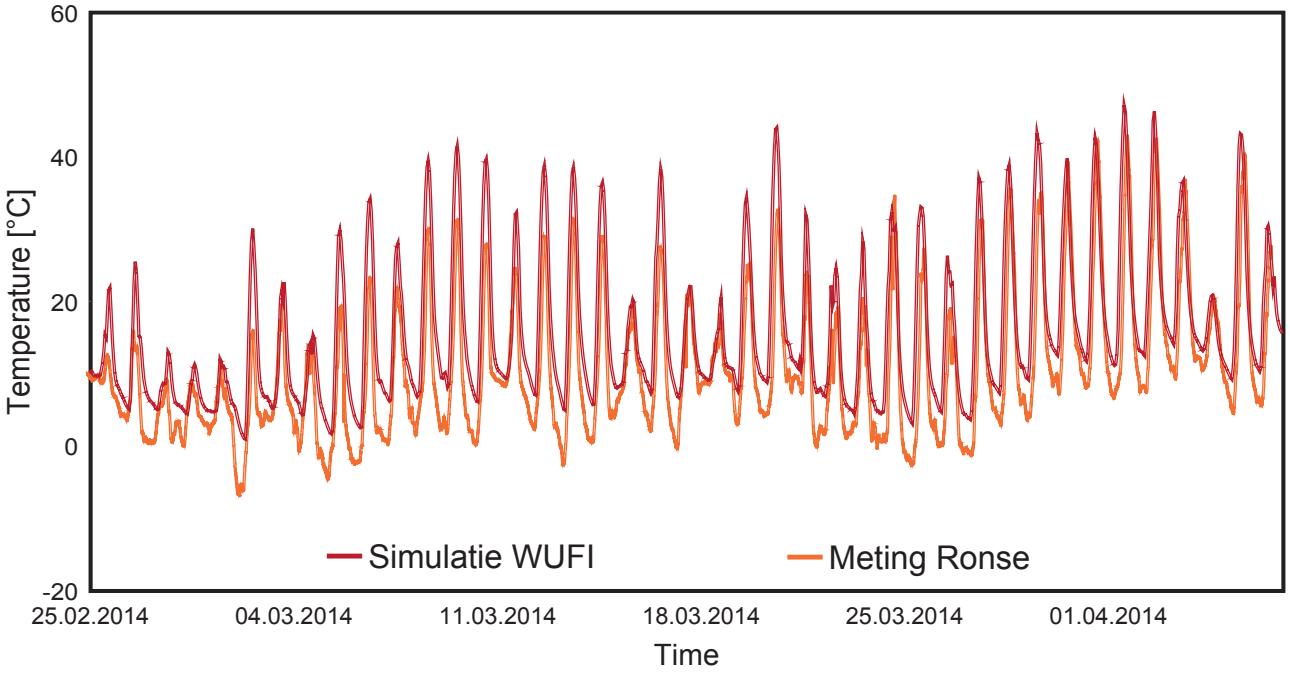


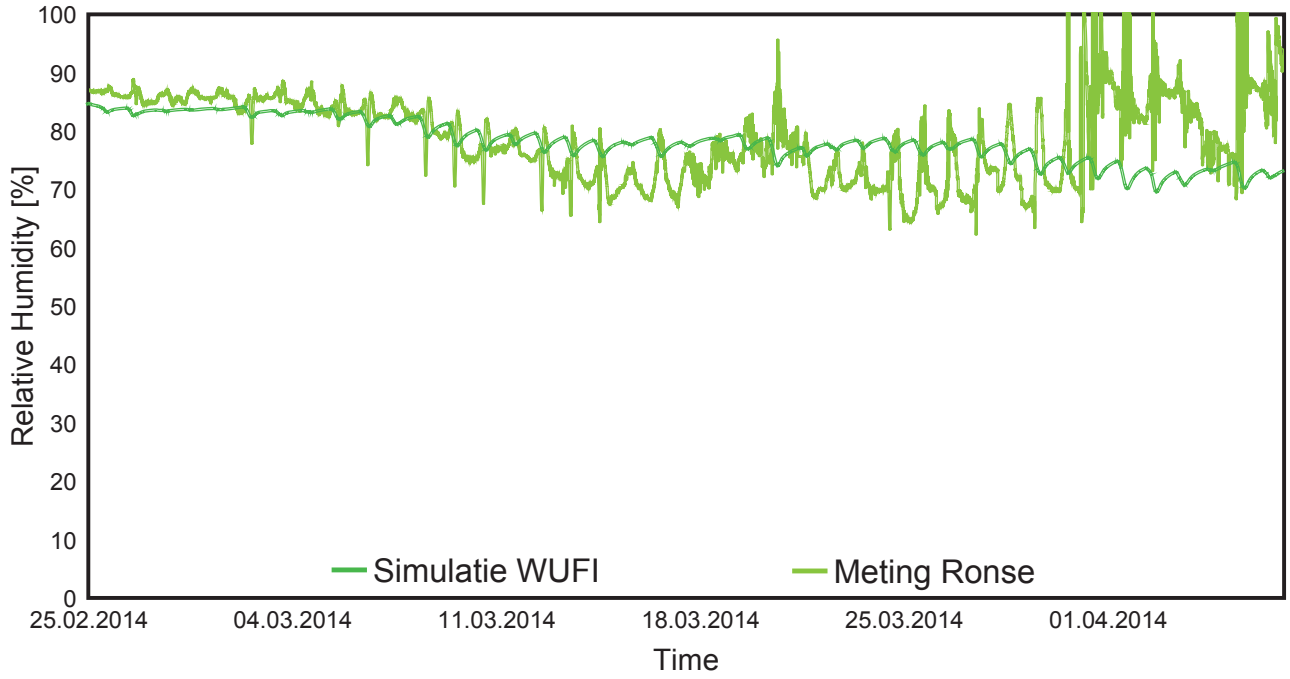




Meting ~ Simulatie Dakopbouw 3: OSB Steico Zell

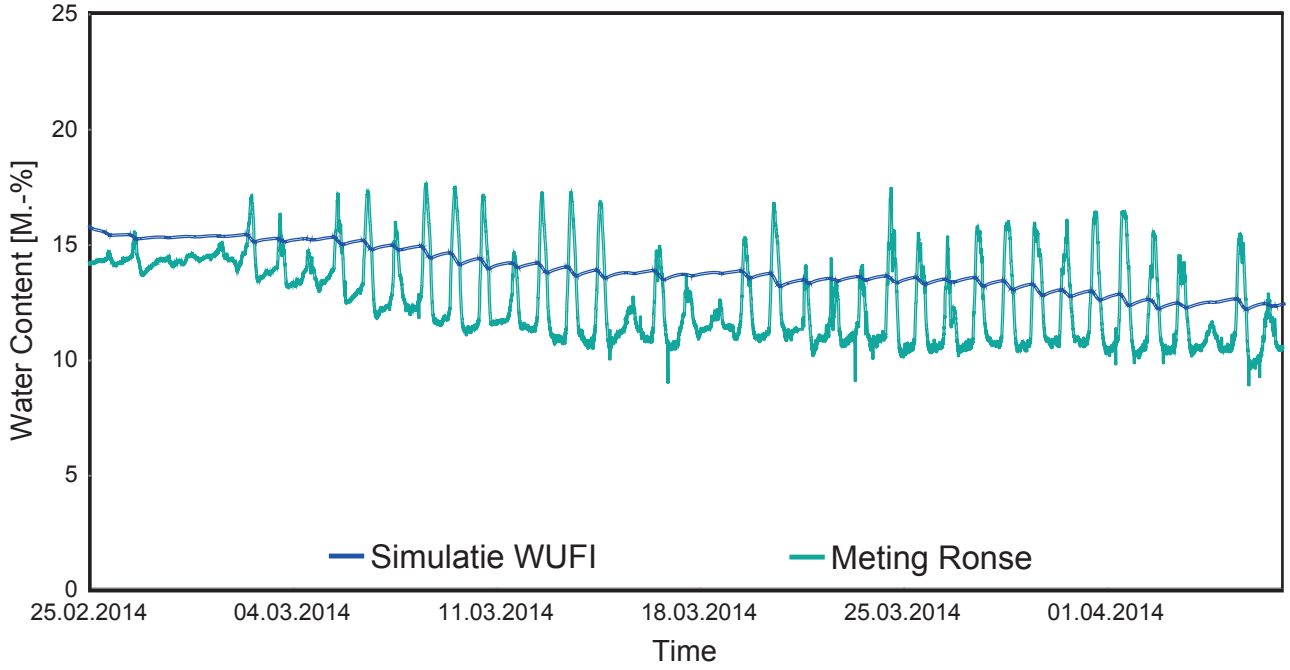


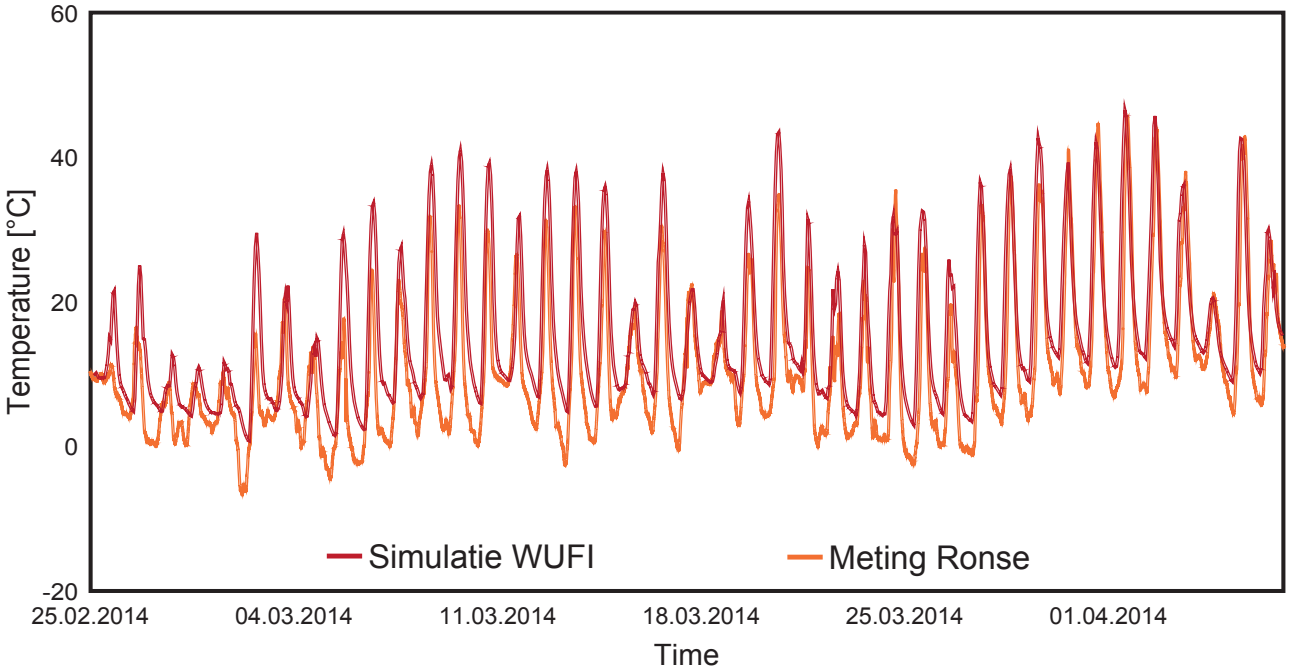


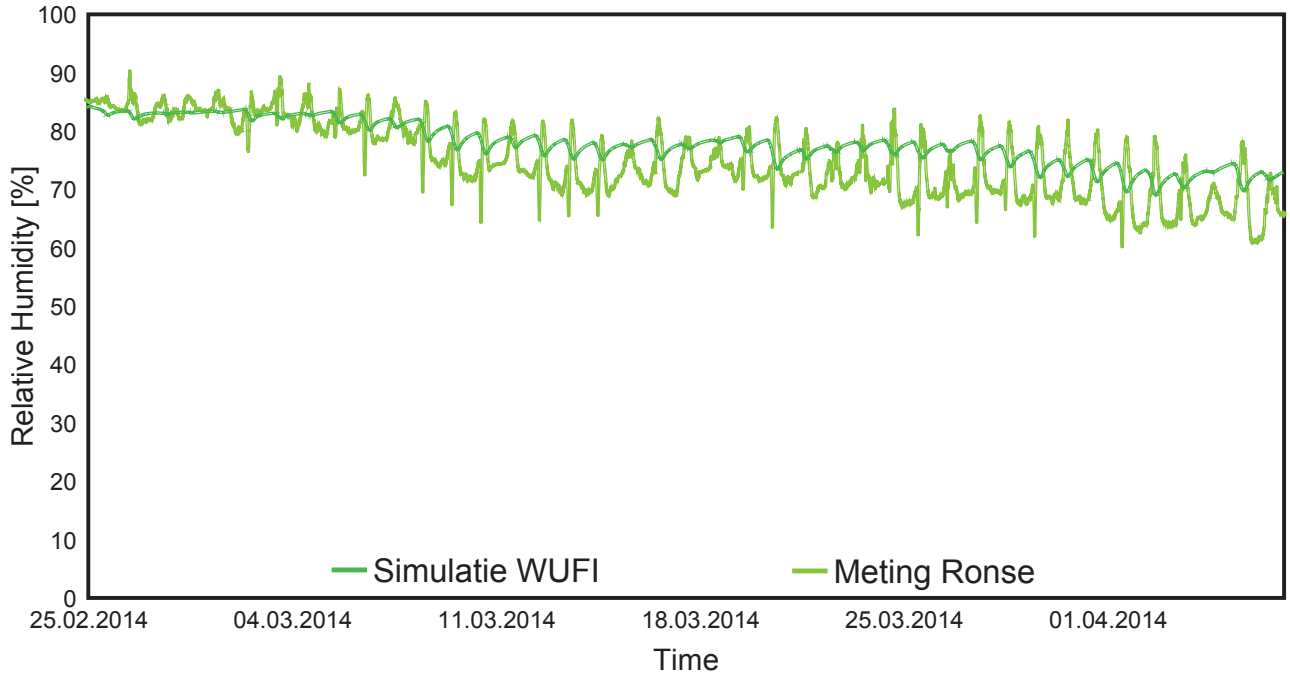


Meting ~ Simulatie

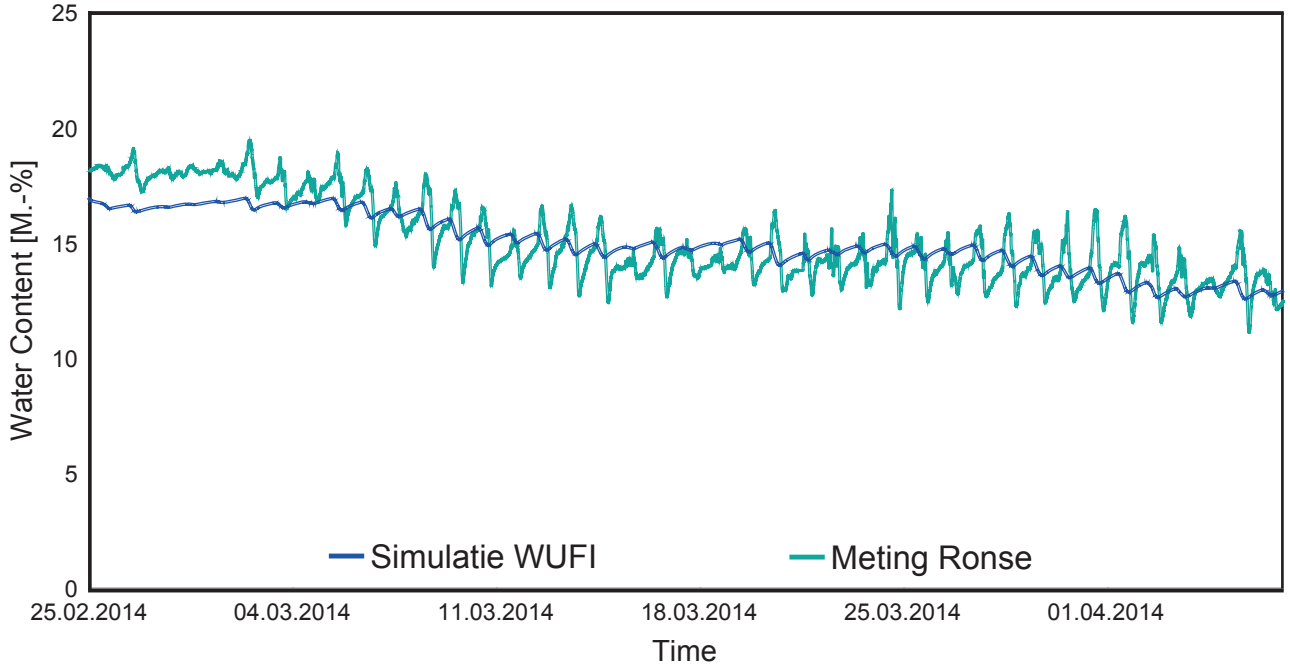
Dakopbouw 4: OSB Isofloc

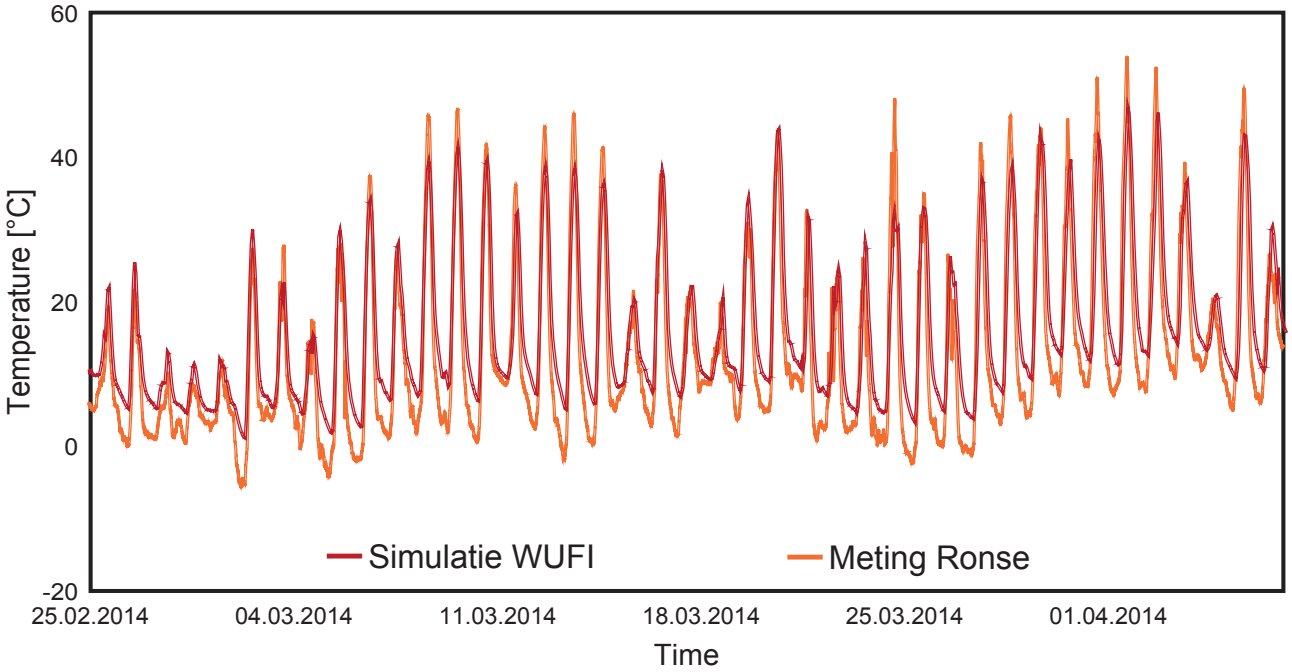


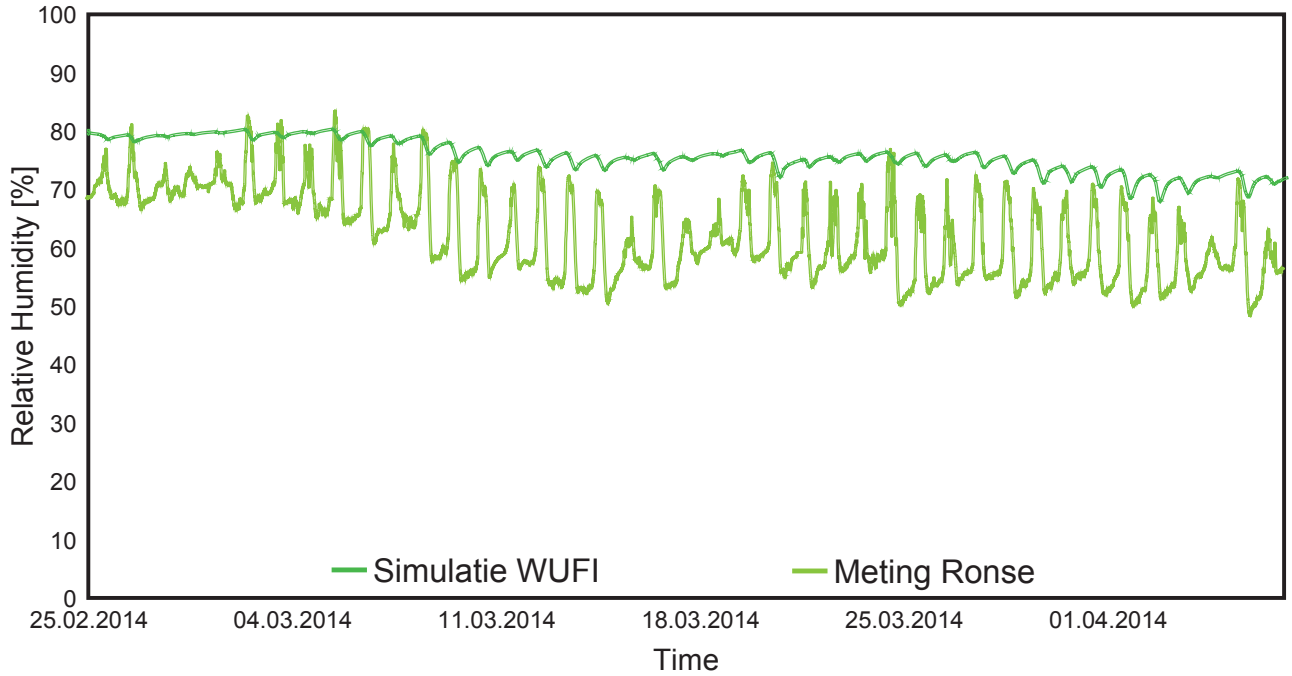




Meting ~ Simulatie Dakopbouw 5: Intello Steico Zell

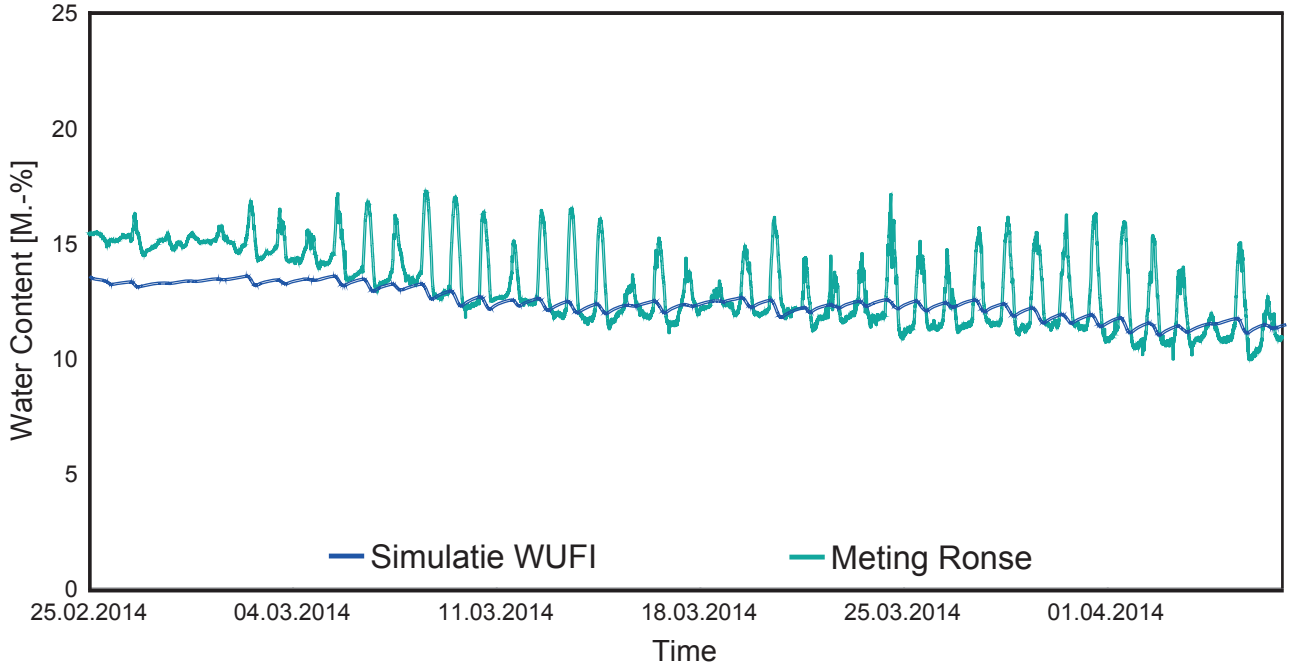


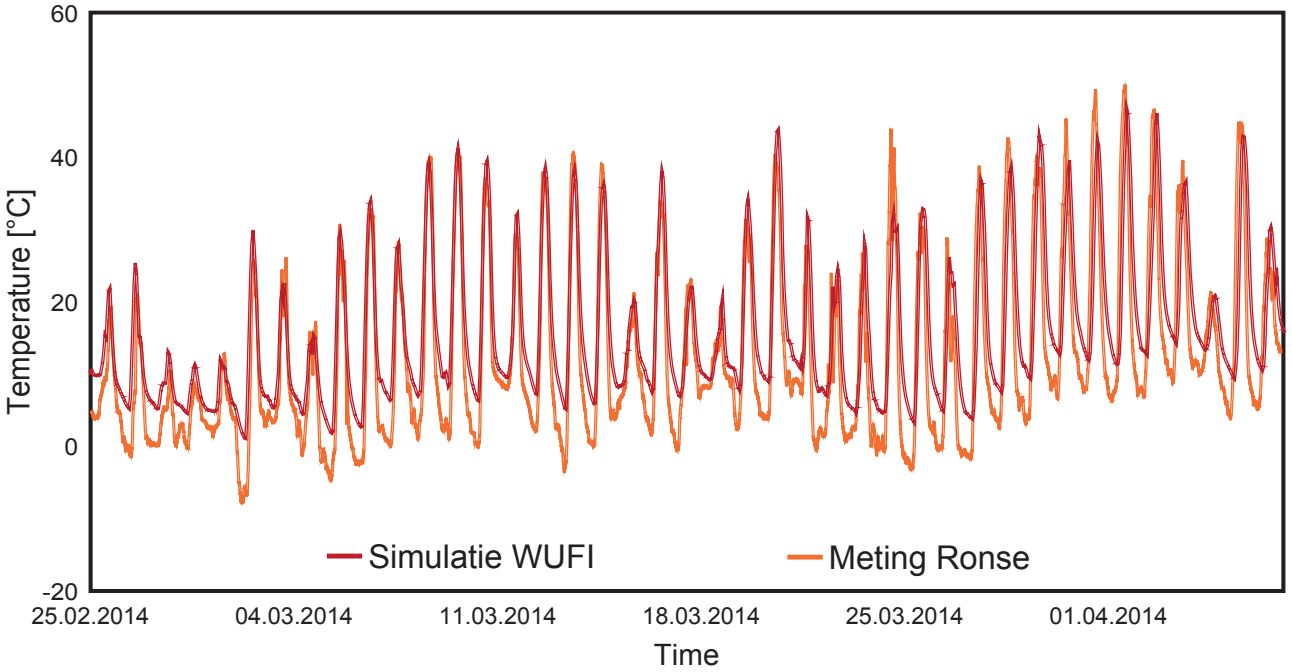


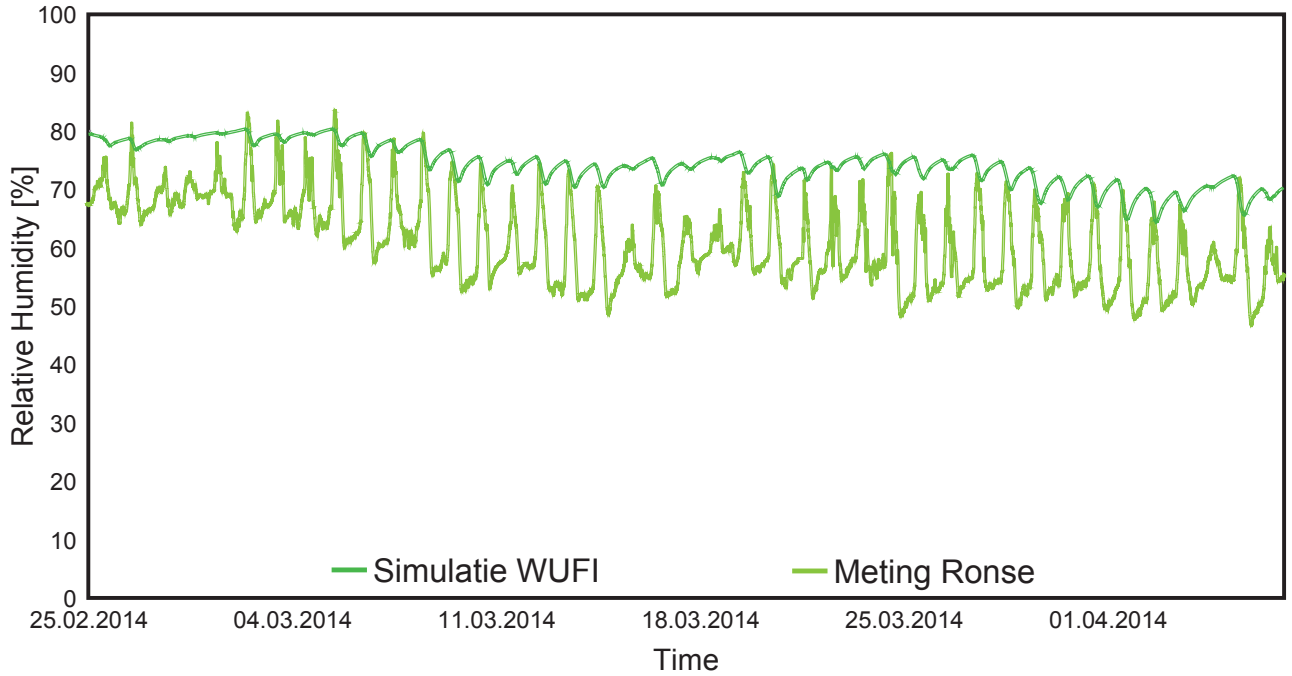


Meting ~ Simulatie

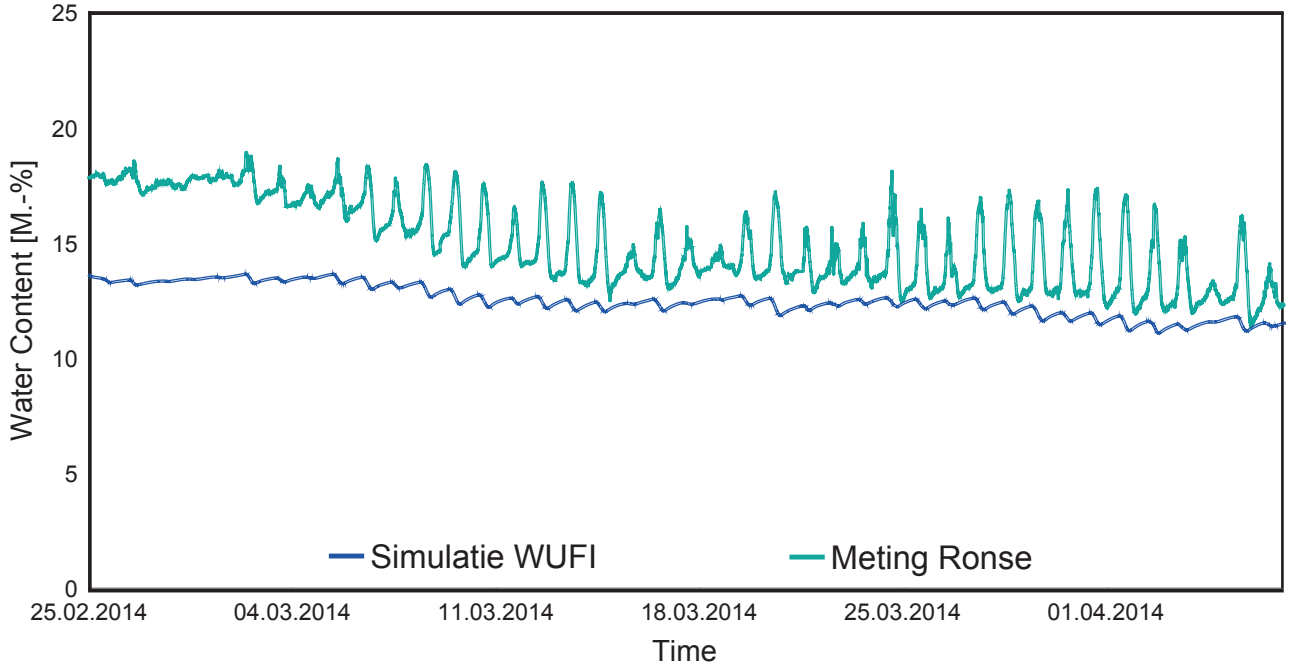
Dakopbouw 6: Intello Isofloc

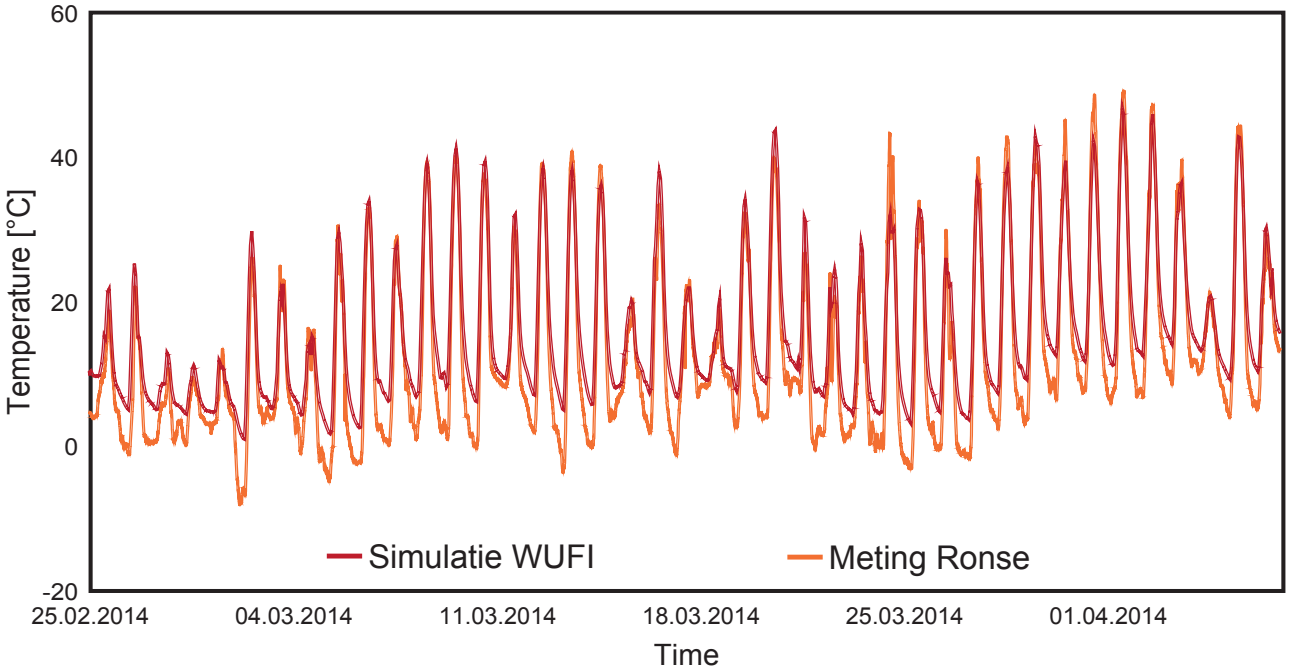


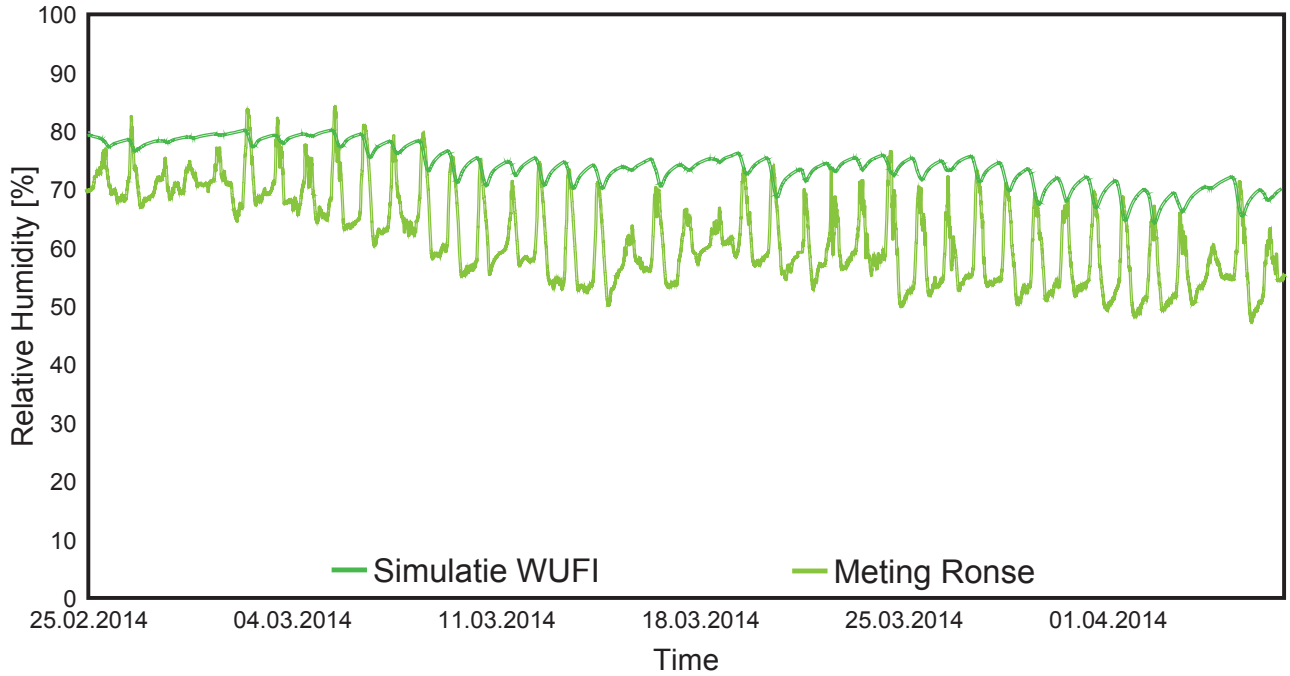




Meting ~ Simulatie Dakopbouw 7: PE-folie Steico Zell

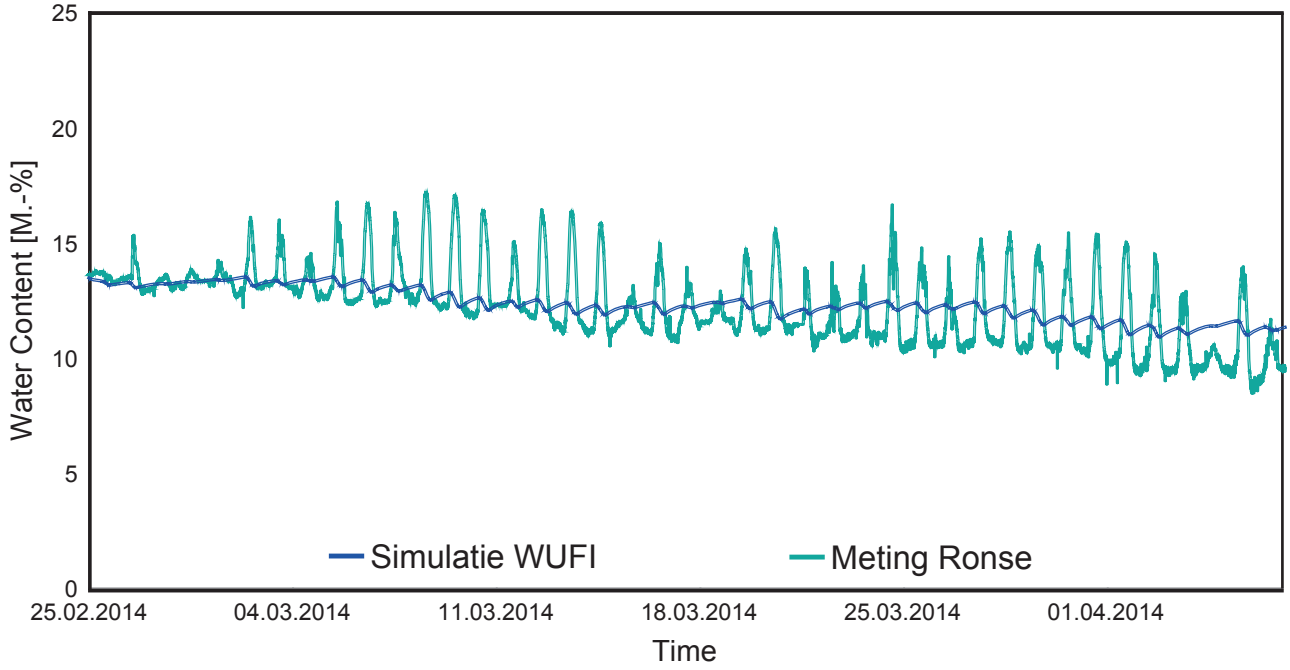


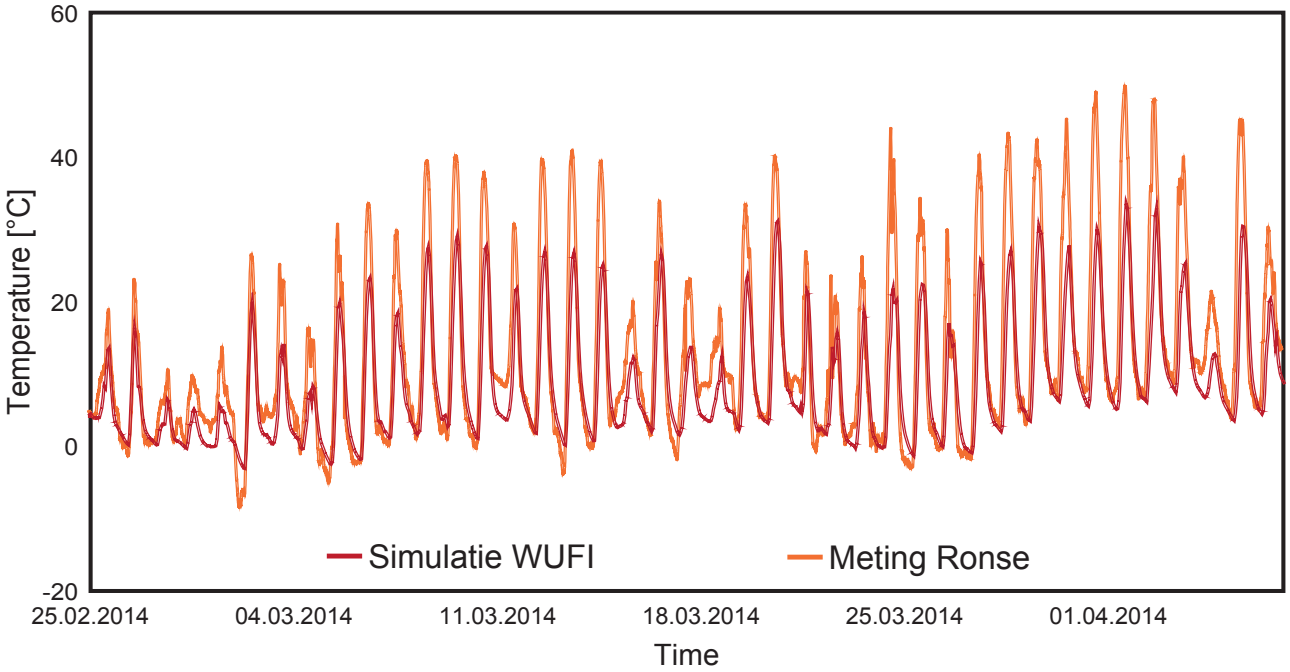


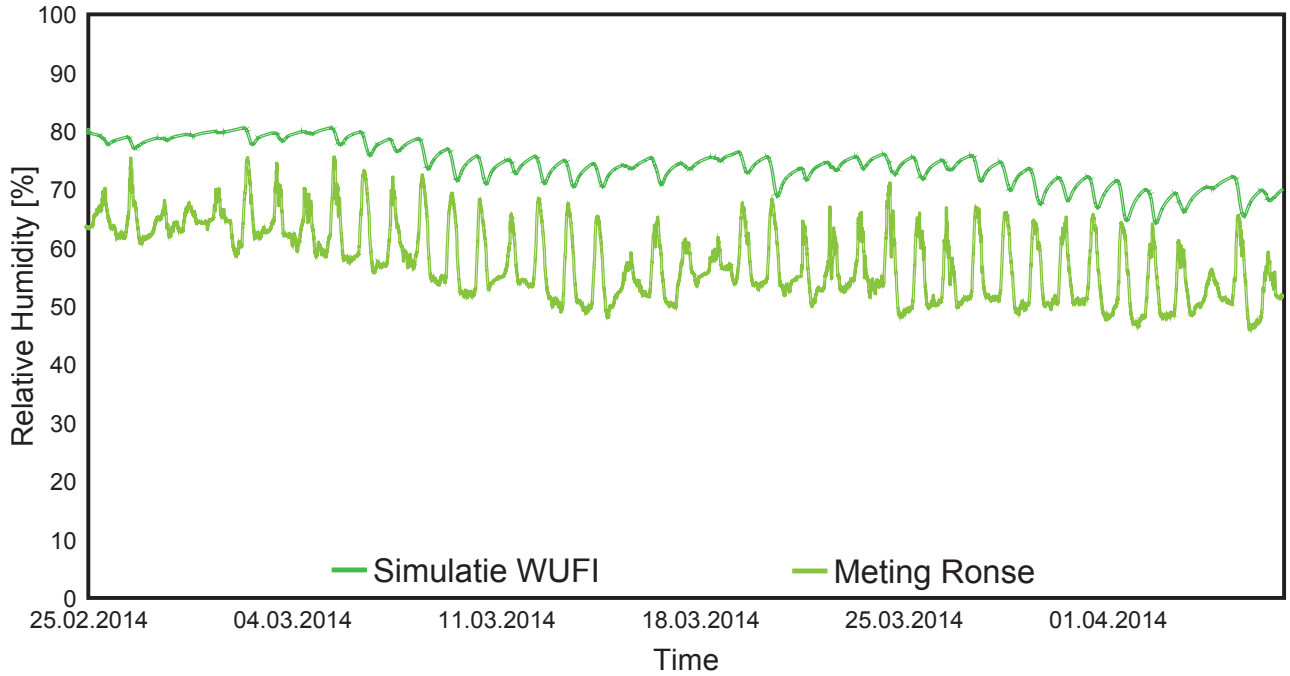


Meting ~ Simulatie

Dakopbouw 8: PE-folie Isofloc



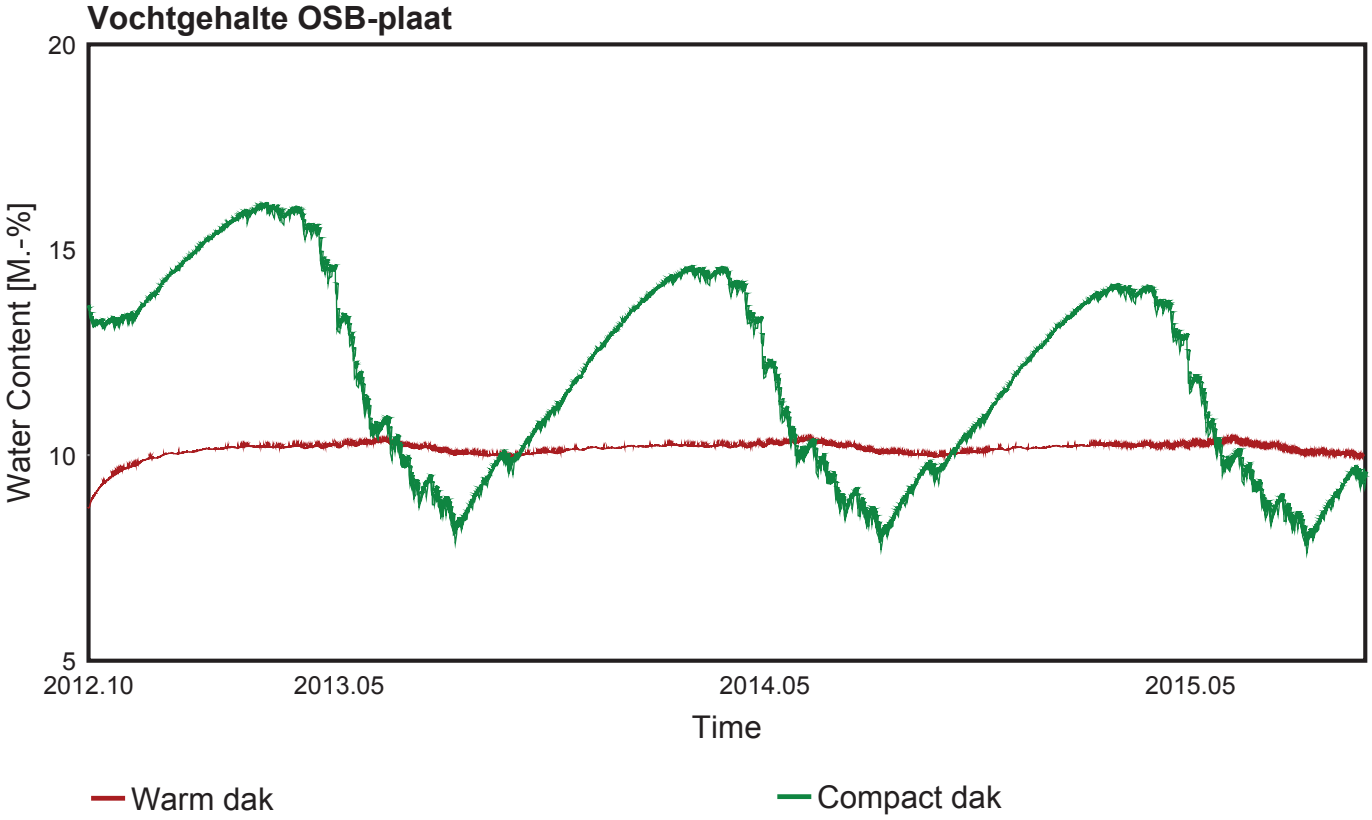


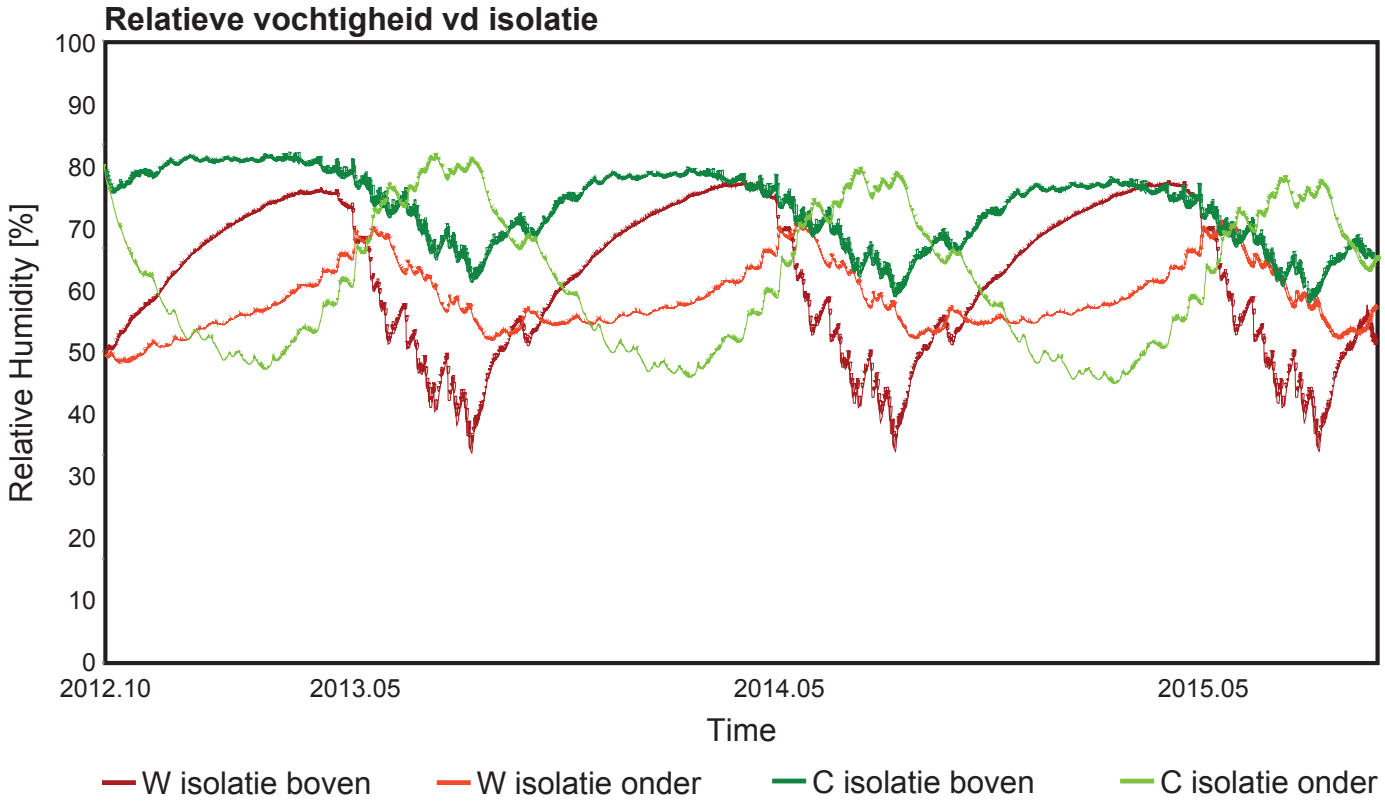


BIJLAGE E

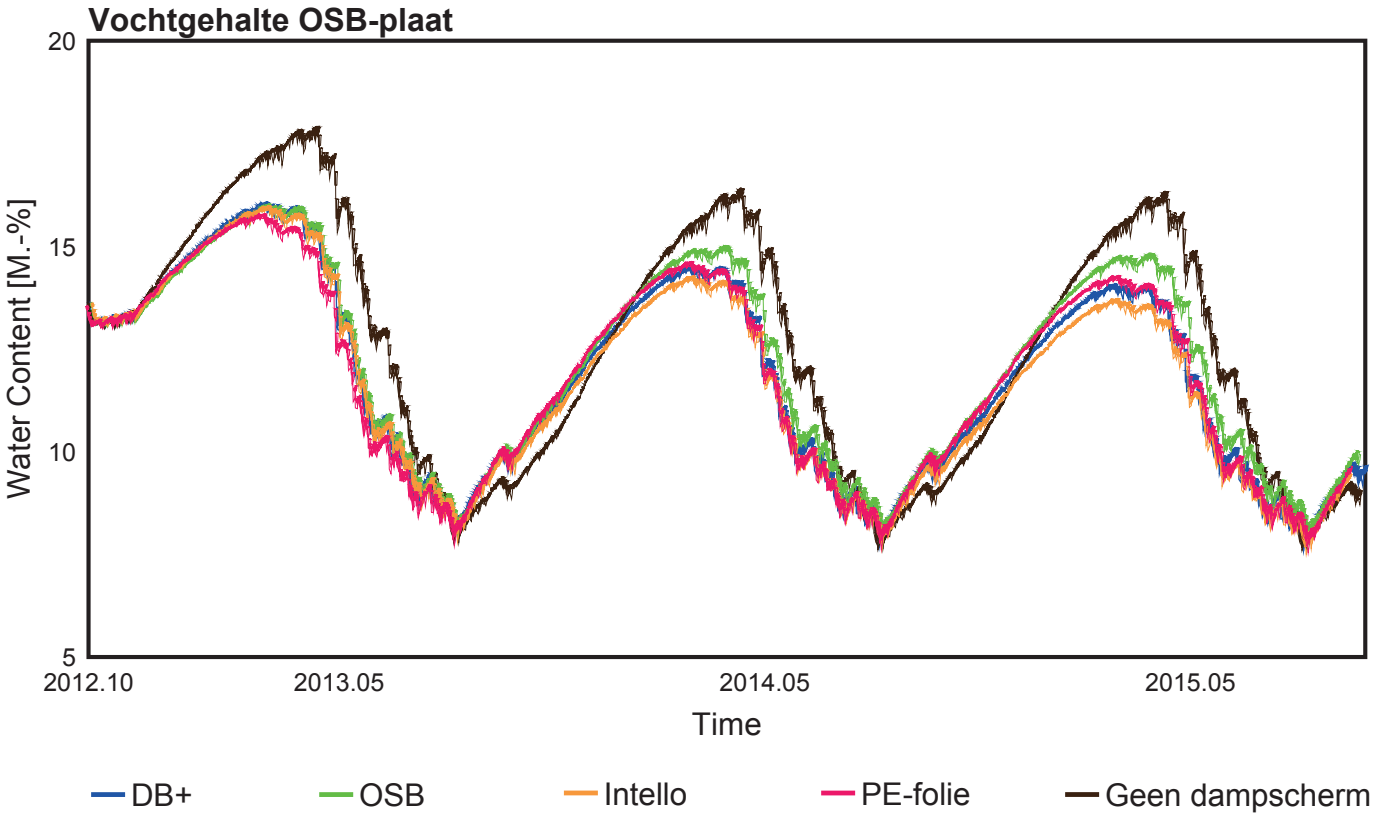
RESULTATEN ONDERZOEKSCASES

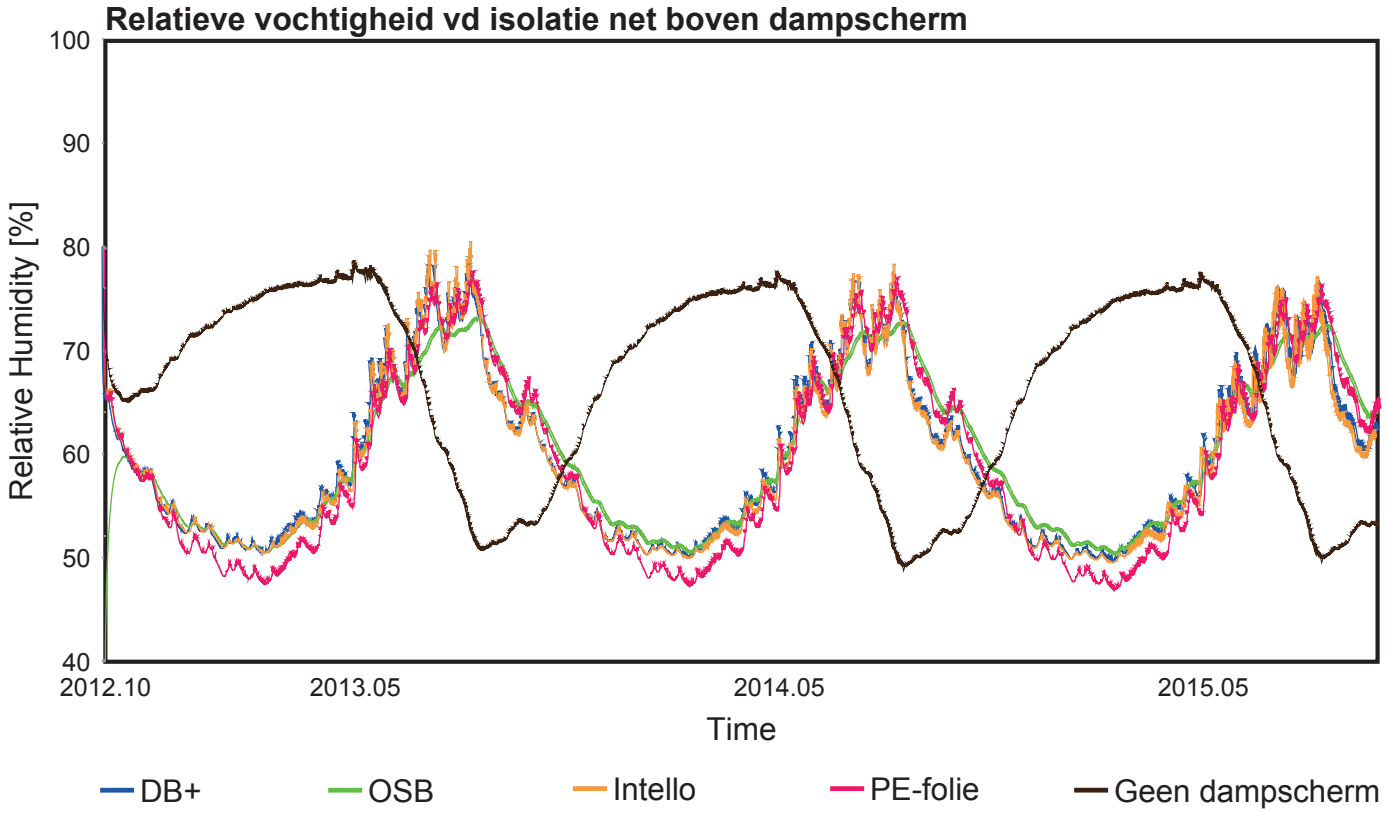
Vergelijking warm dak - compact dak



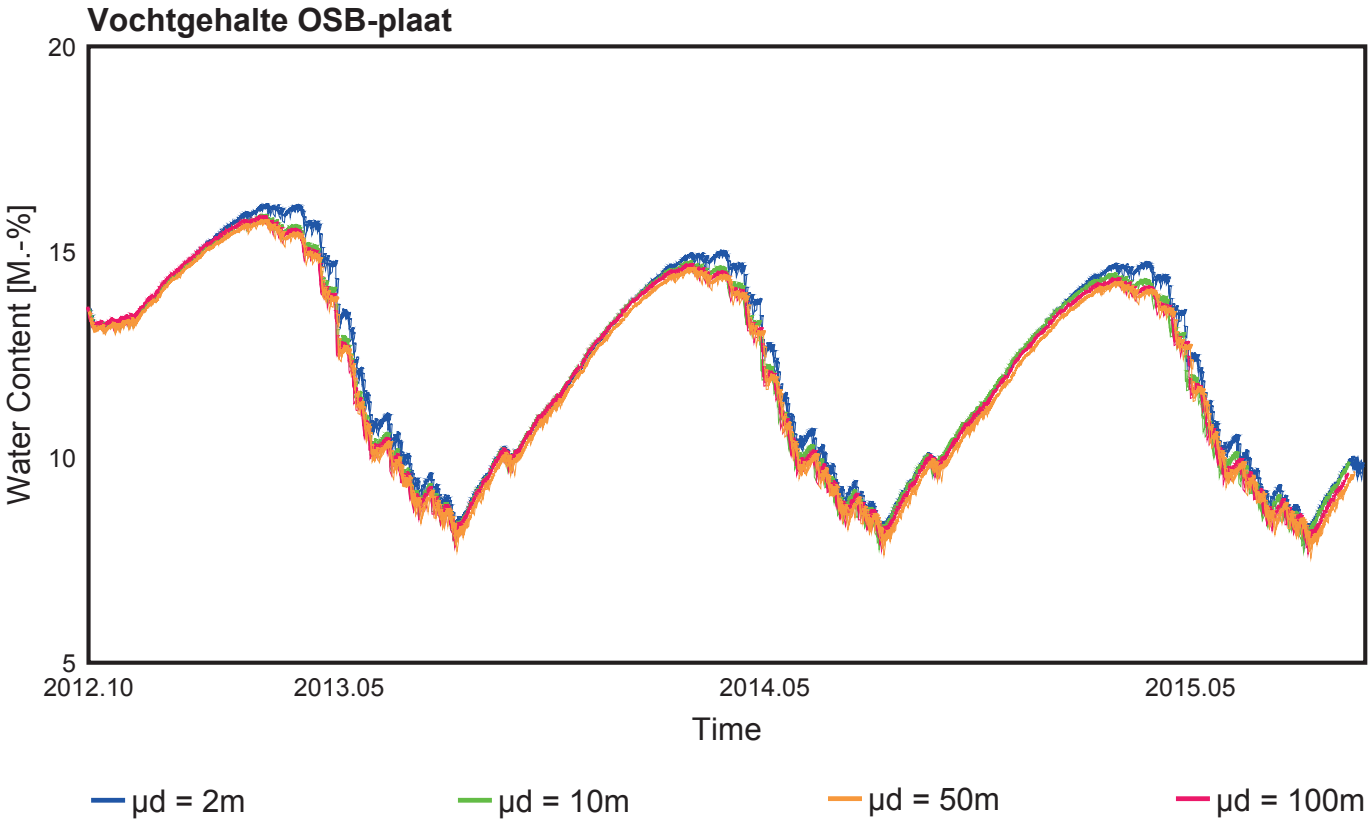


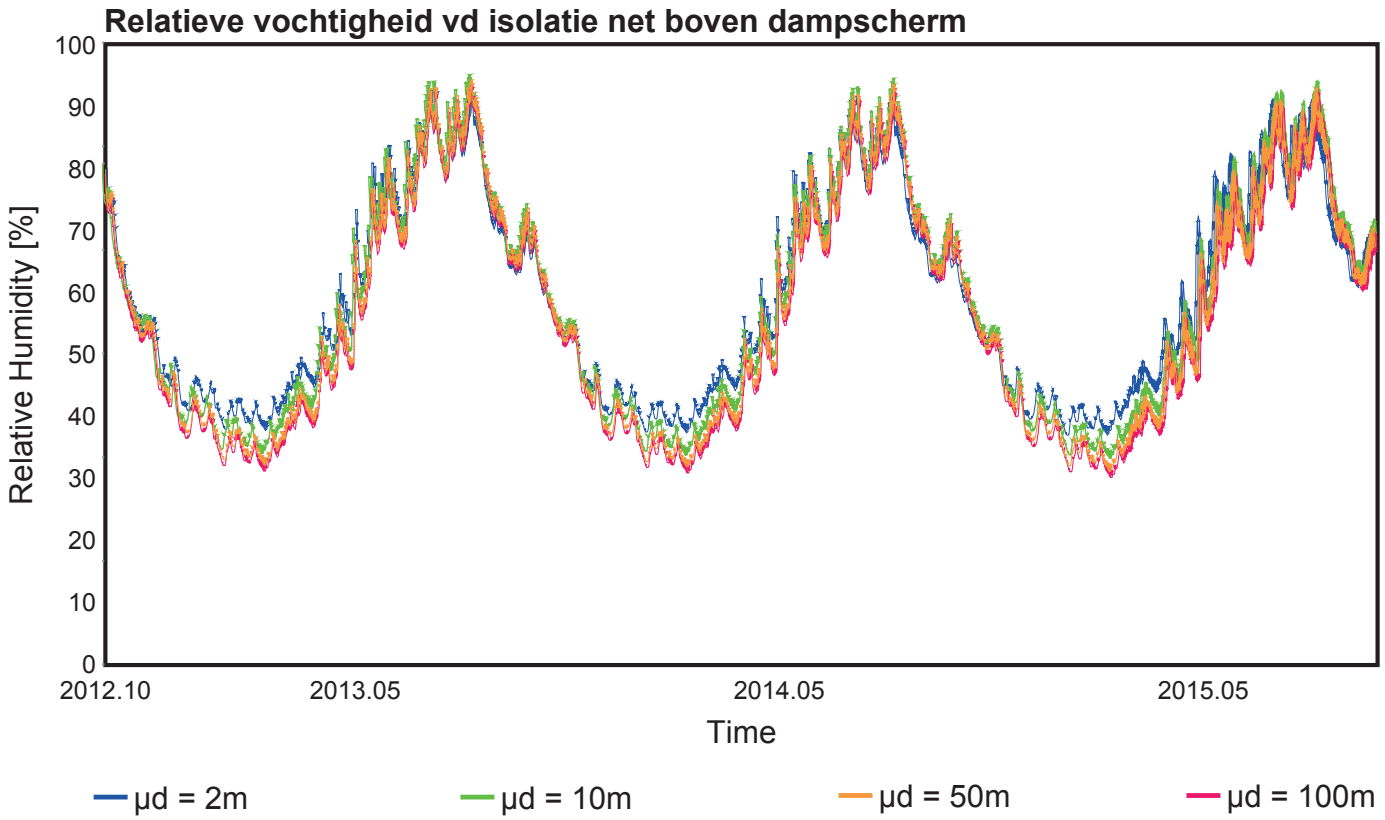
Vergelijking dampschermen



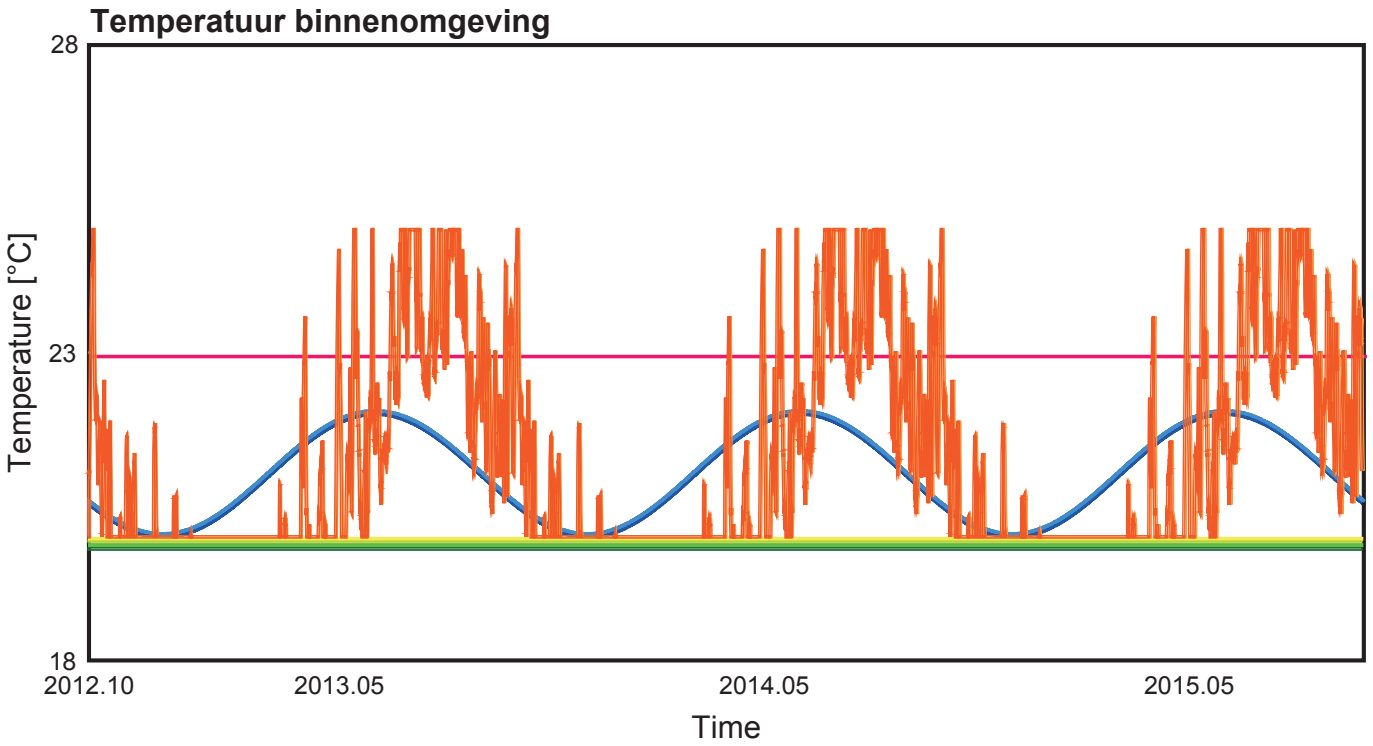


Vergelijking dampschermen: PE-folie





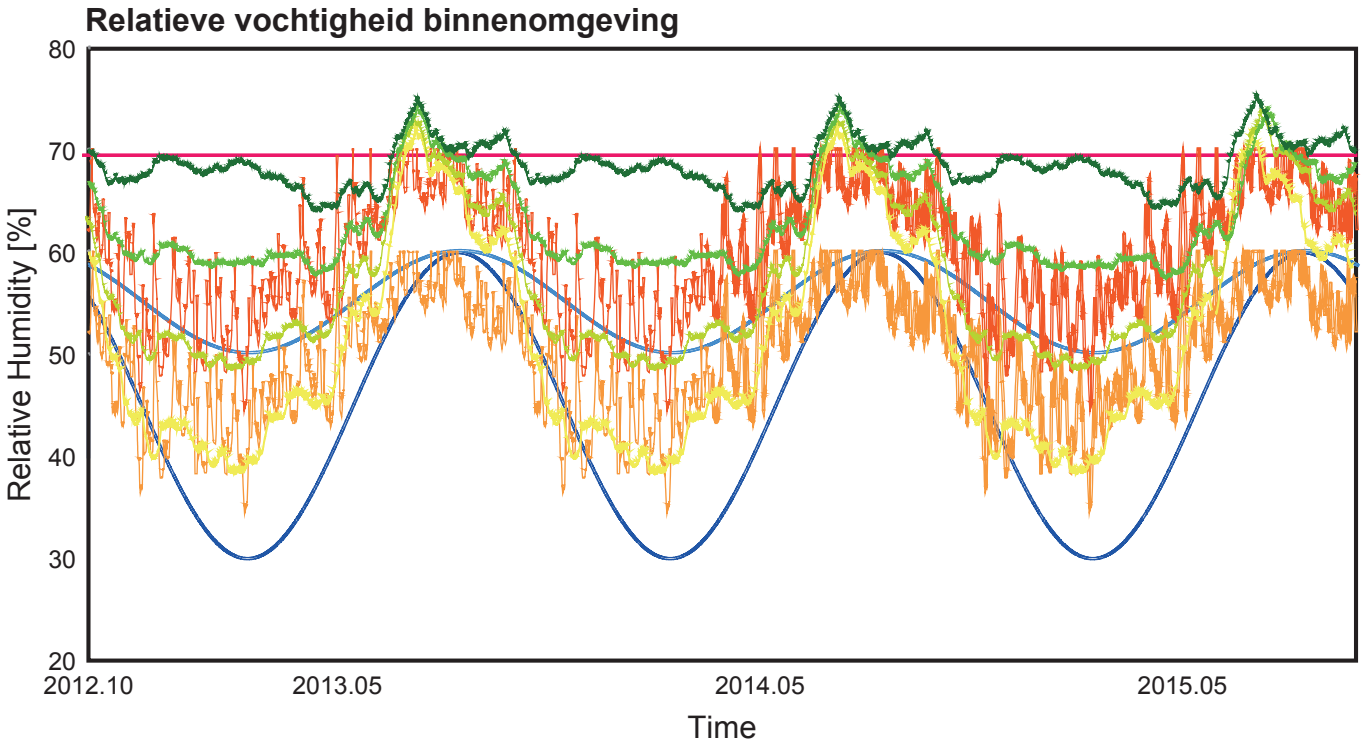
Binnenklimaat



WTA Recommendation
- Low moisture load
- High moisture load

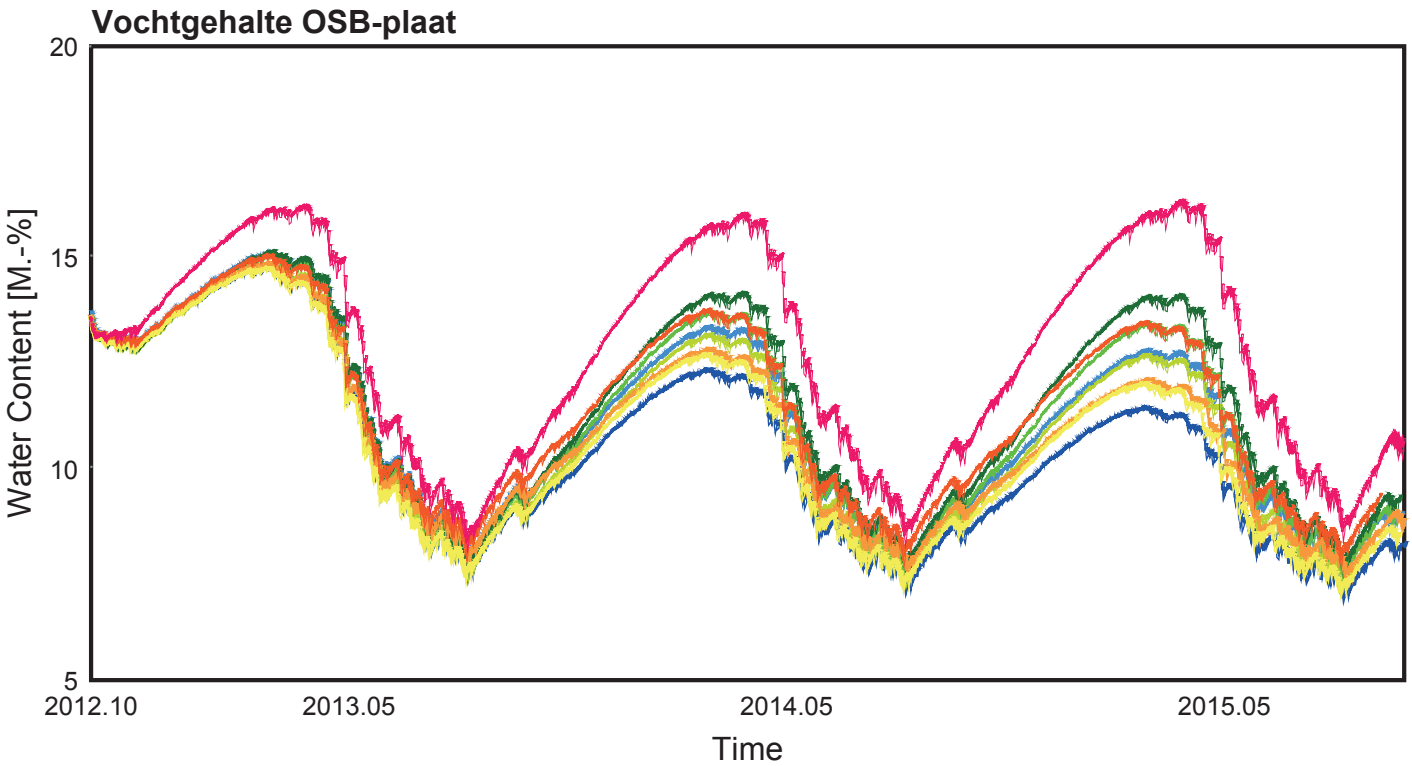
EN 13788
- Hummidity class 1
- Hummidity class 2
- Hummidity class 3
- Hummidity class 4

EN 15026
- Normal Moisture load
- High Moisture load
- 23°C / 70%RV



Binnenklimaat

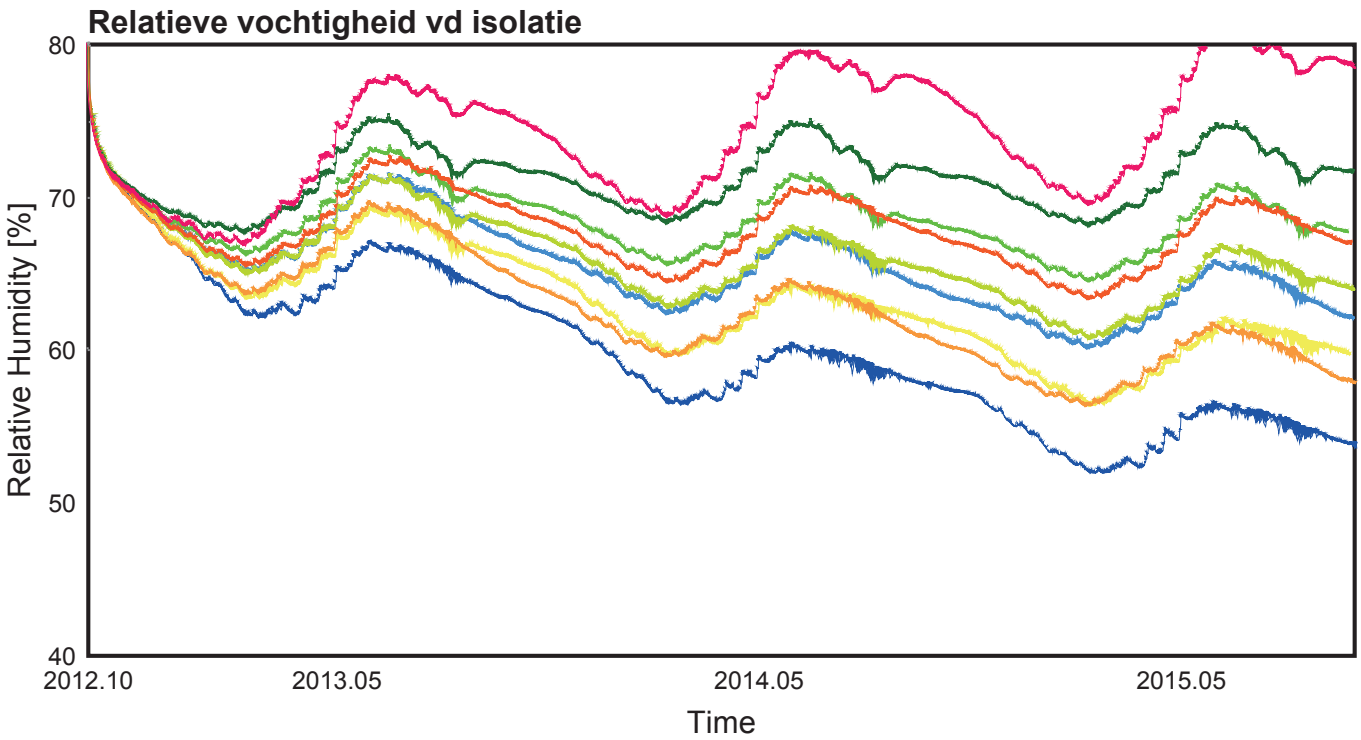
Dakopbouw : OSB Isofloc



WTA Recommendation
- Low moisture load
- High moisture load

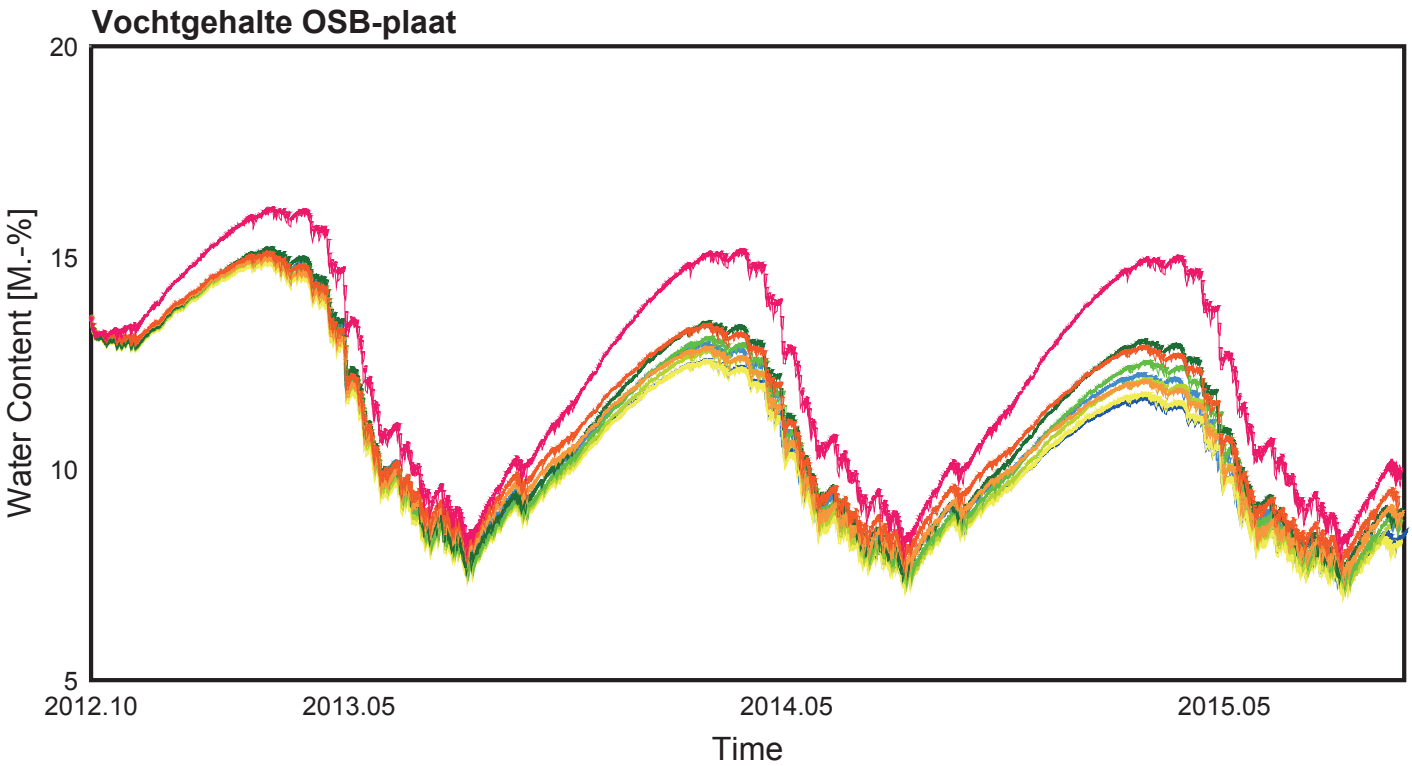
EN 13788
- Hummidity class 1
- Hummidity class 2
- Hummidity class 3
- Hummidity class 4

EN 15026
- Normal Moisture load
- High Moisture load
- 23°C / 70%RV



Binnenklimaat

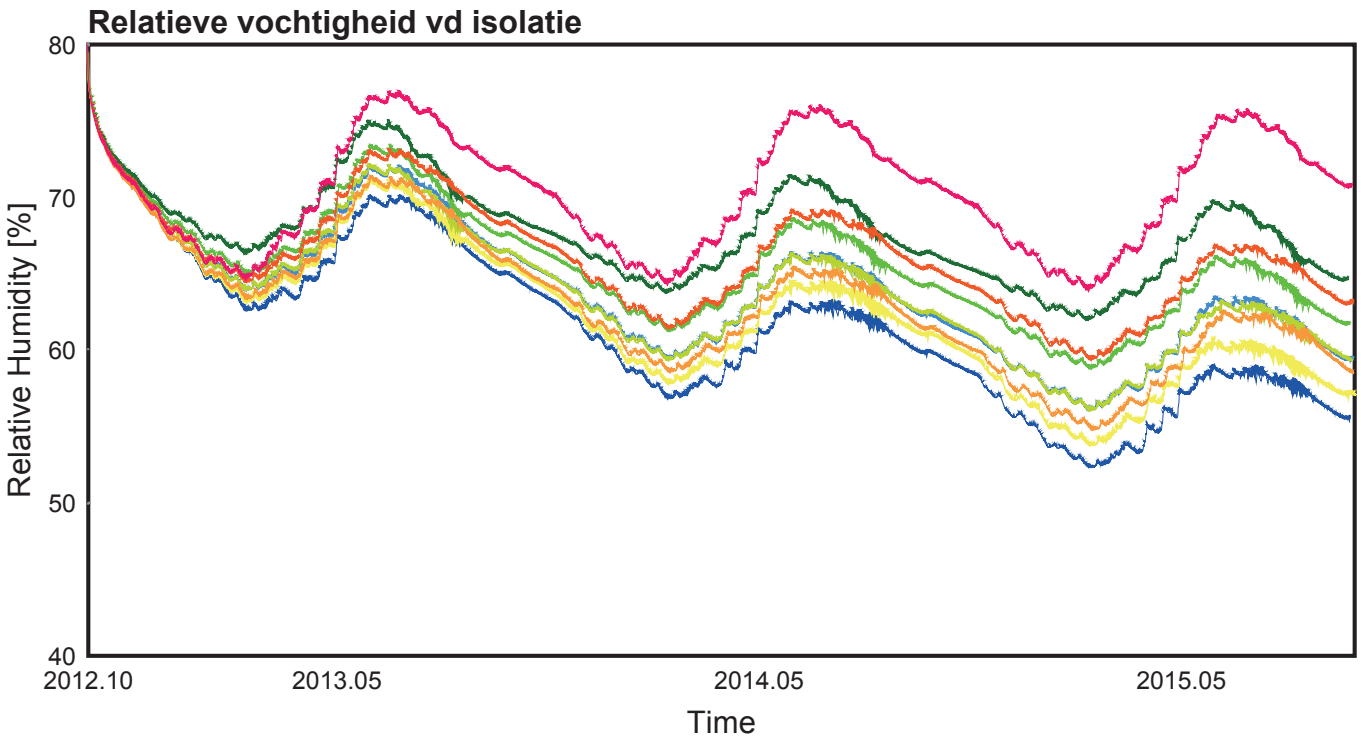
Dakopbouw : Intello Isofloc



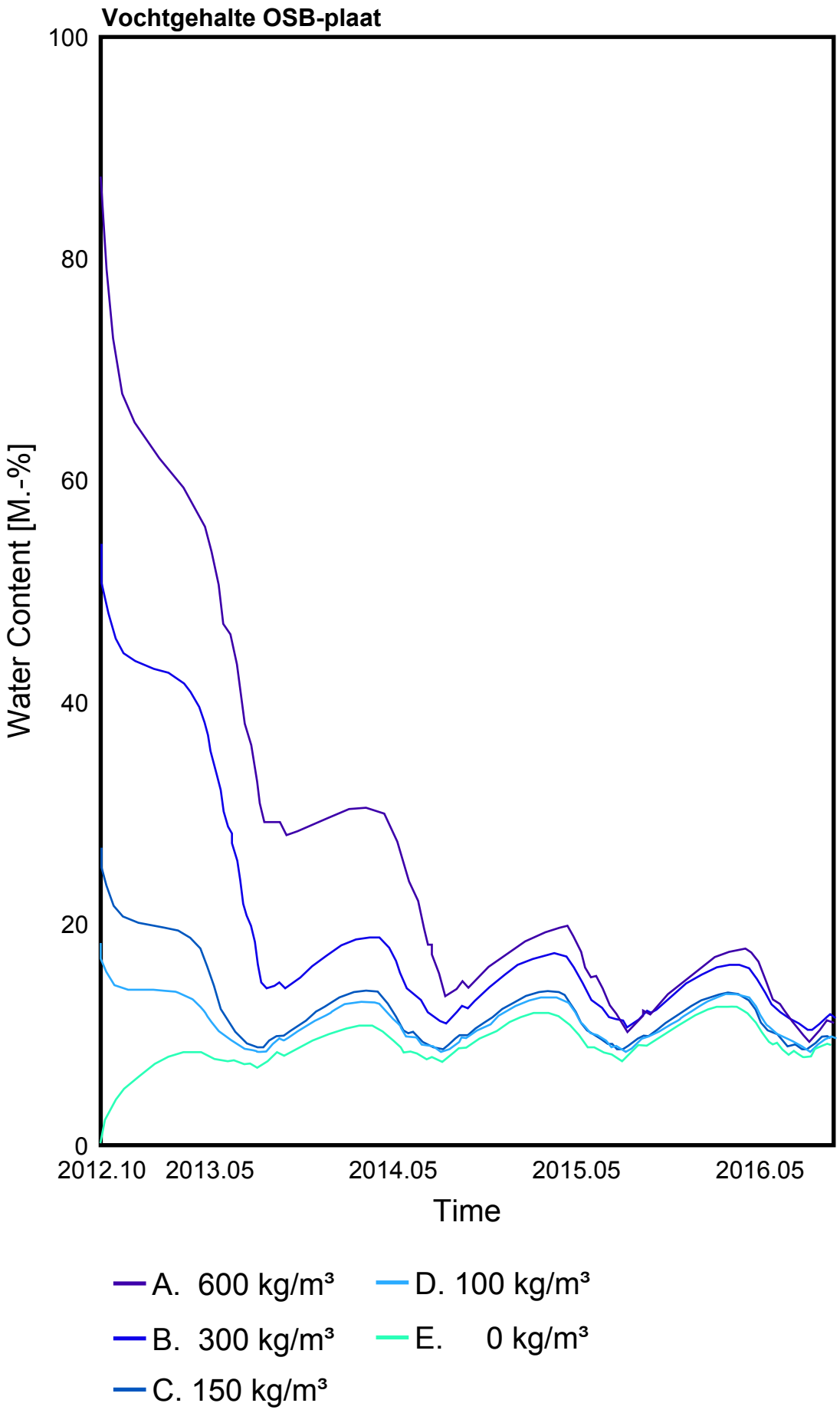
WTA Recommendation
- Low moisture load
- High moisture load

EN 13788
- Hummidity class 1
- Hummidity class 2
- Hummidity class 3
- Hummidity class 4

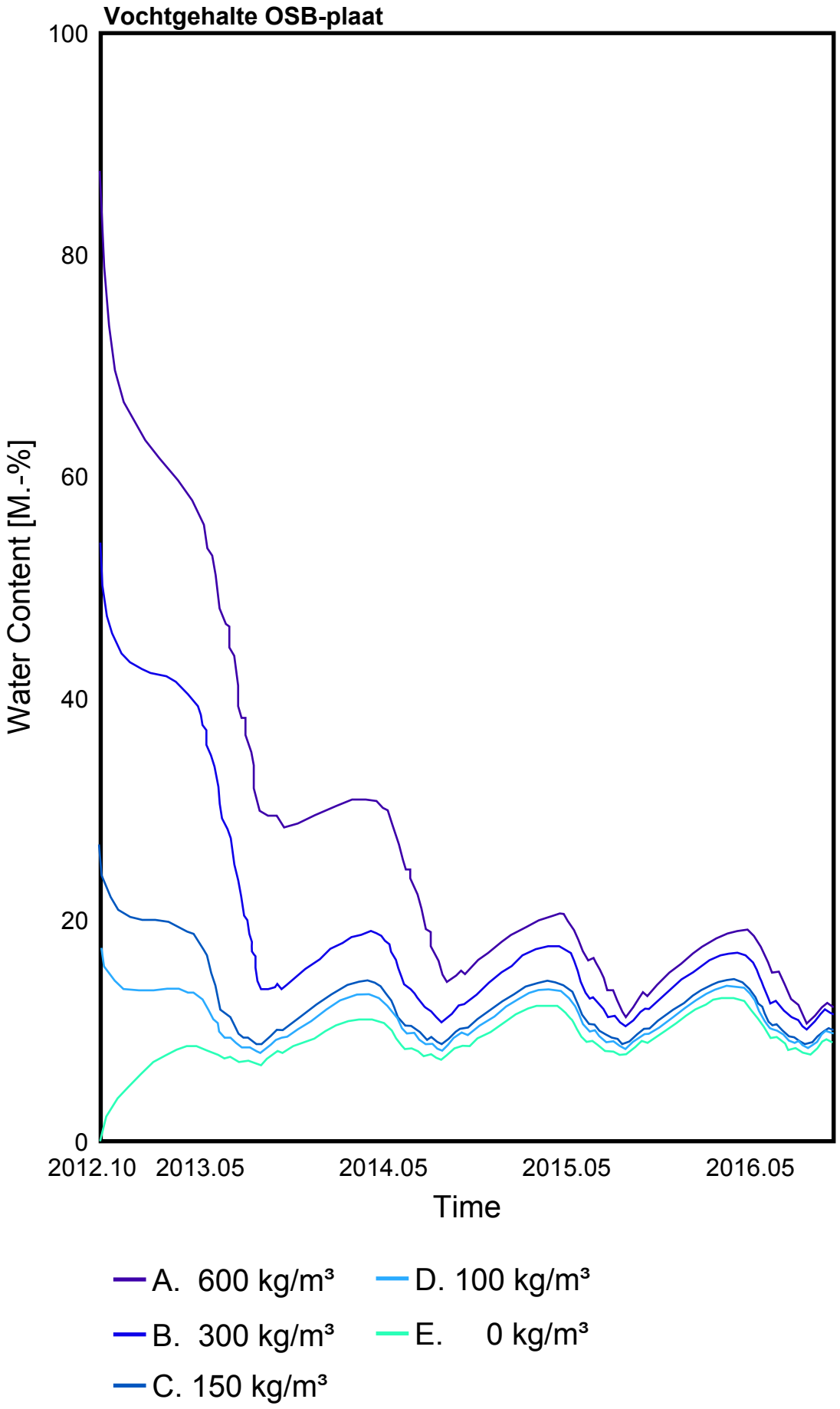
EN 15026
- Normal Moisture load
- High Moisture load
- 23°C / 70%RV



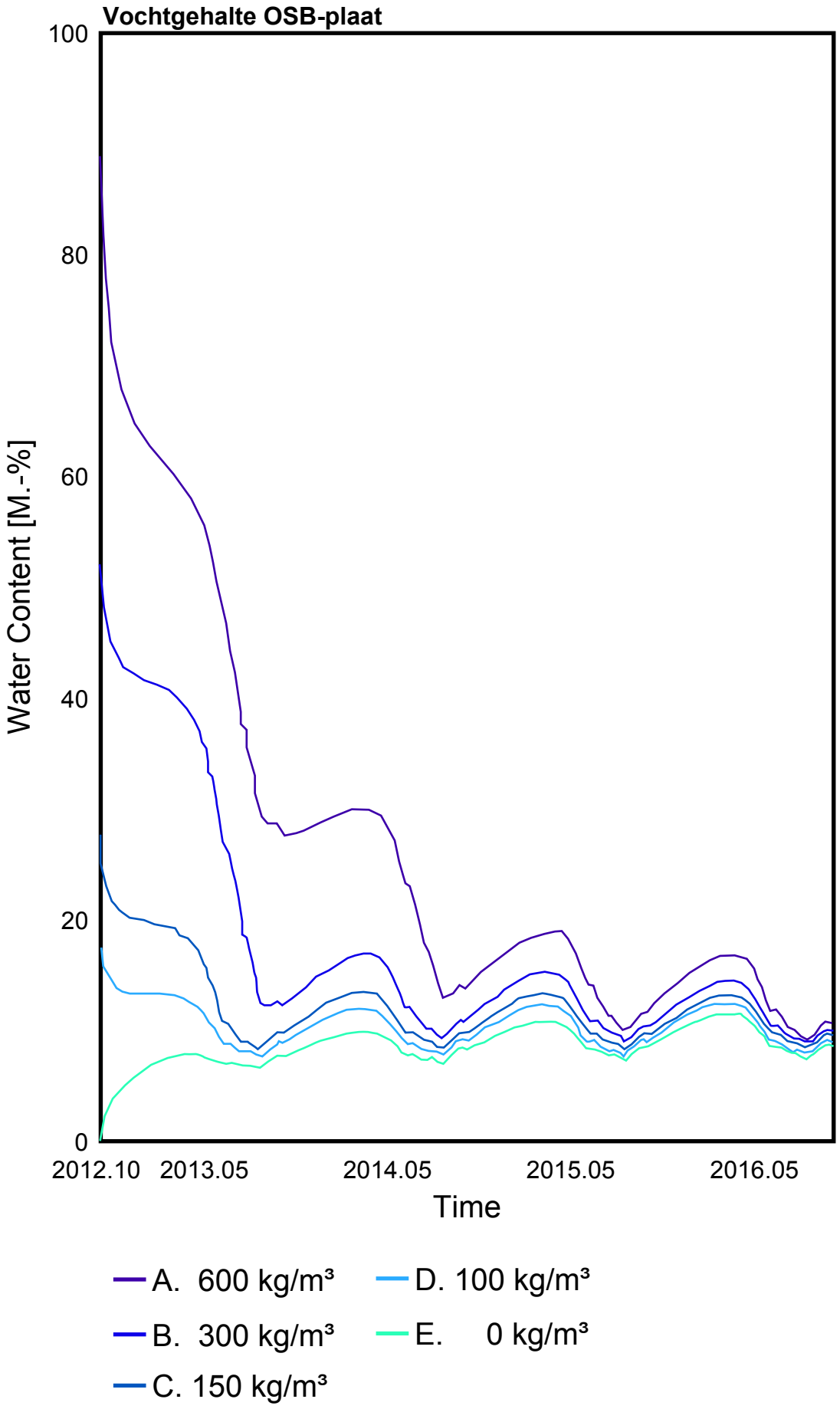
Initieel Vochtgehalte **Dakopbouw: DB+**



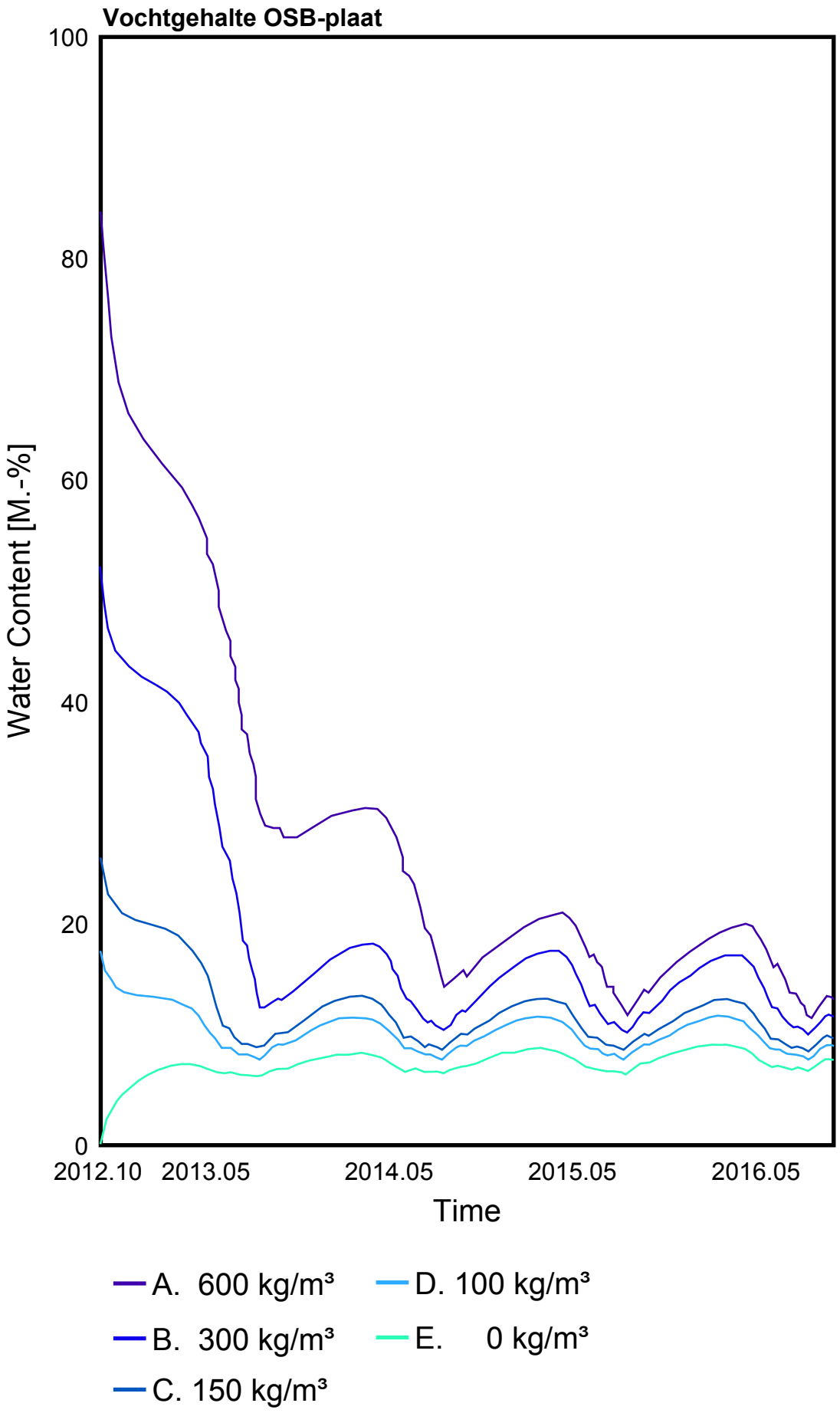
Initieel Vochtgehalte **Dakopbouw: 0SB**



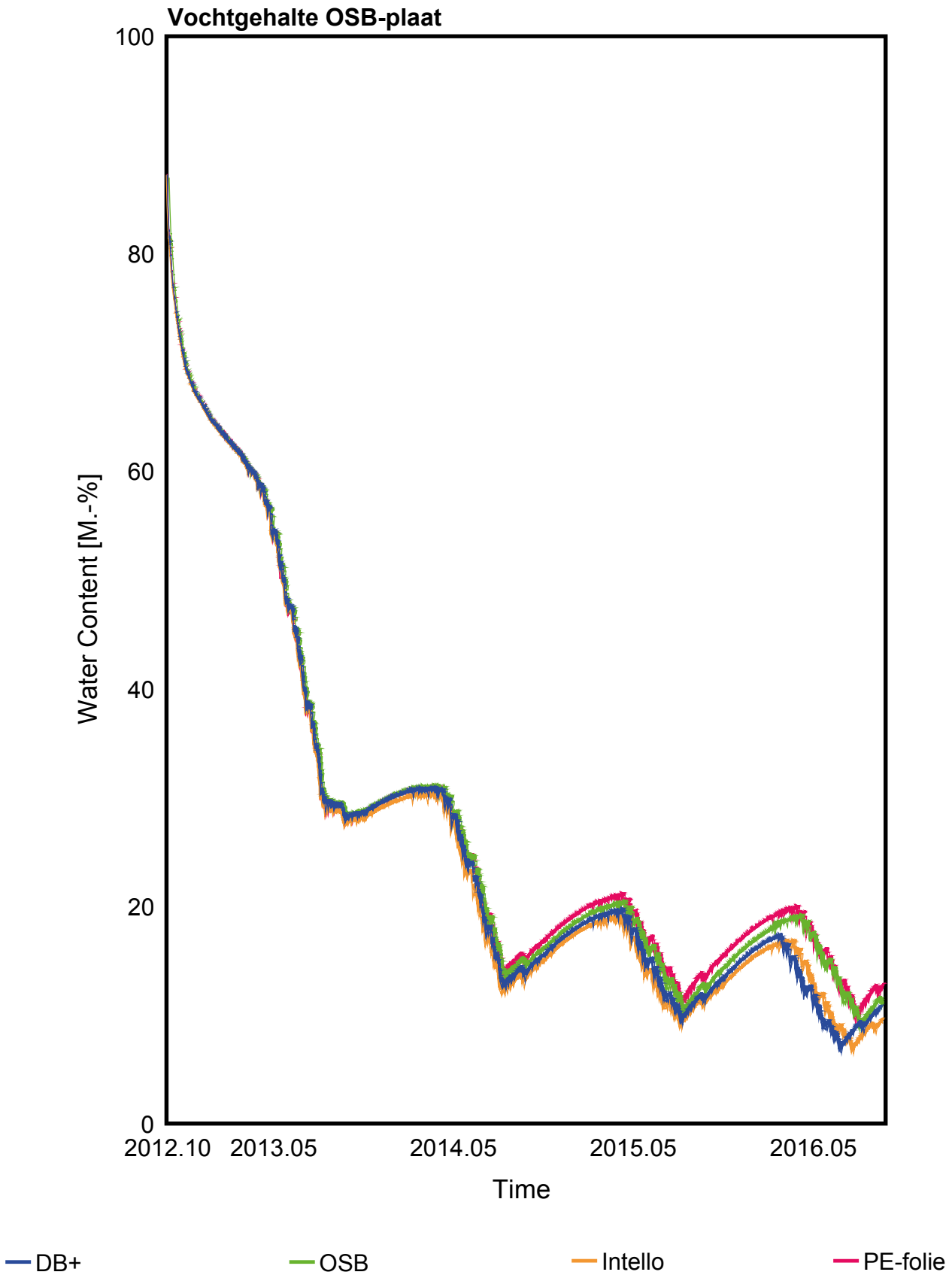
Initieel Vochtgehalte **Dakopbouw: Intello**



Initieel Vochtgehalte - PE-folie **Dakopbouw: PE-folie**

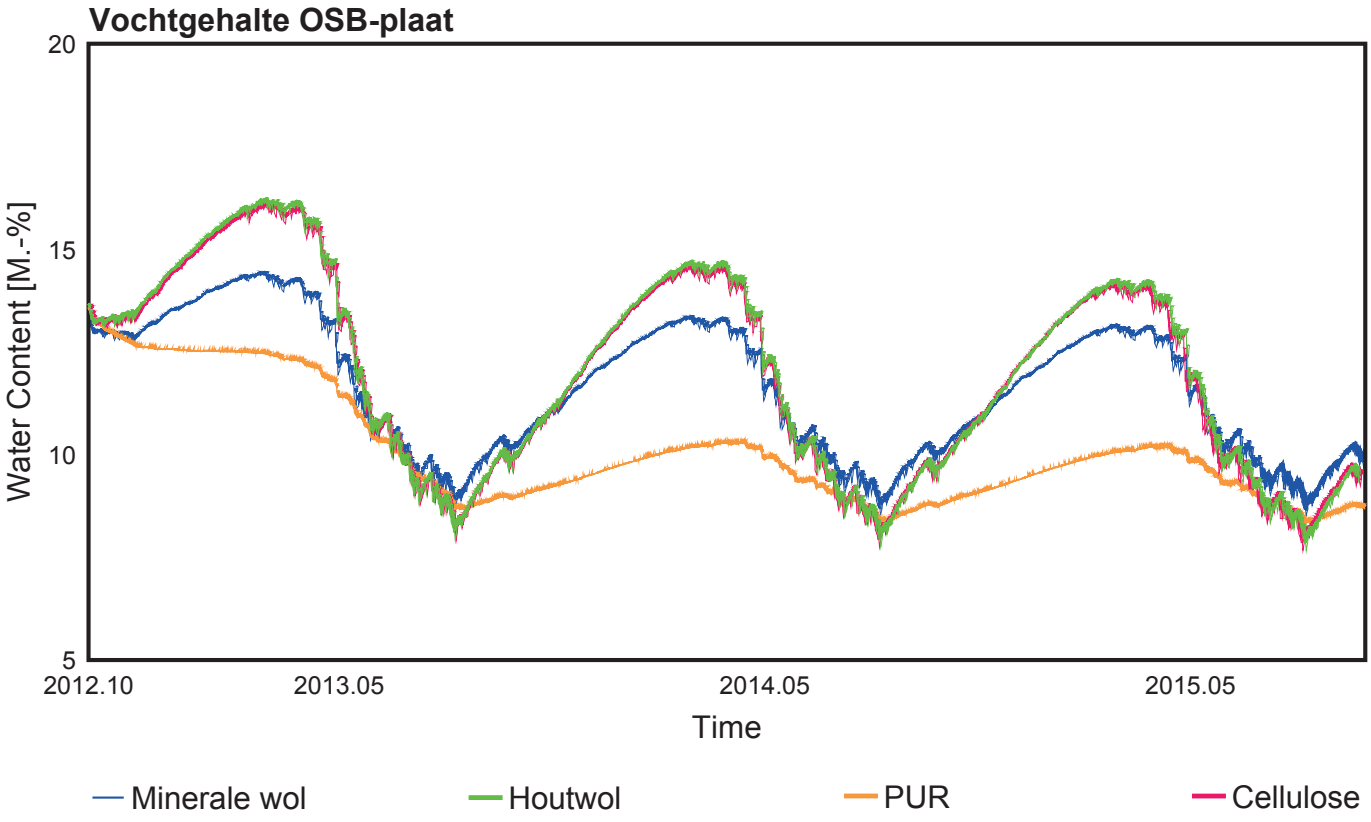


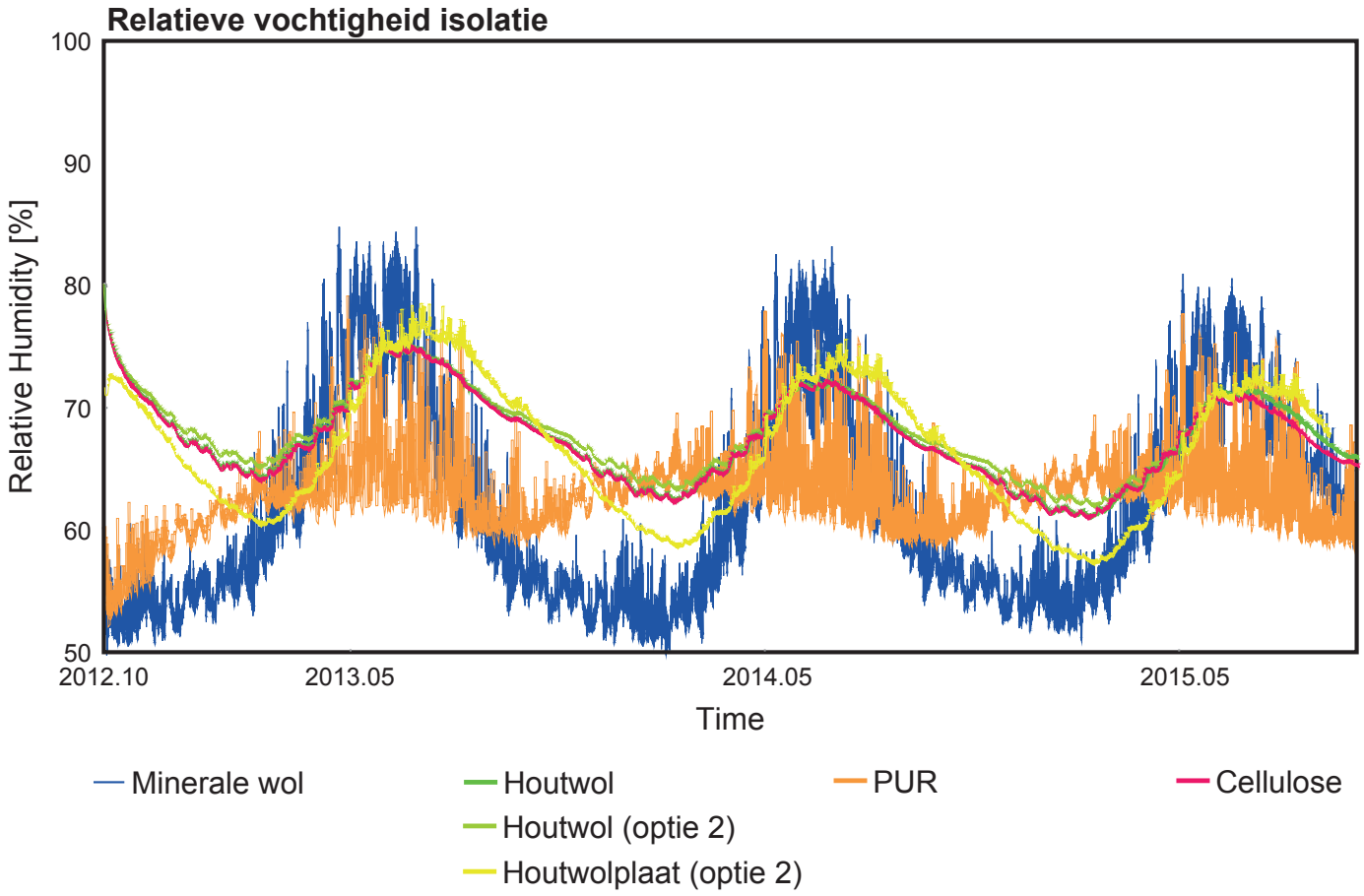
Initieel Vochtgehalte



Andere isolatiematerialen

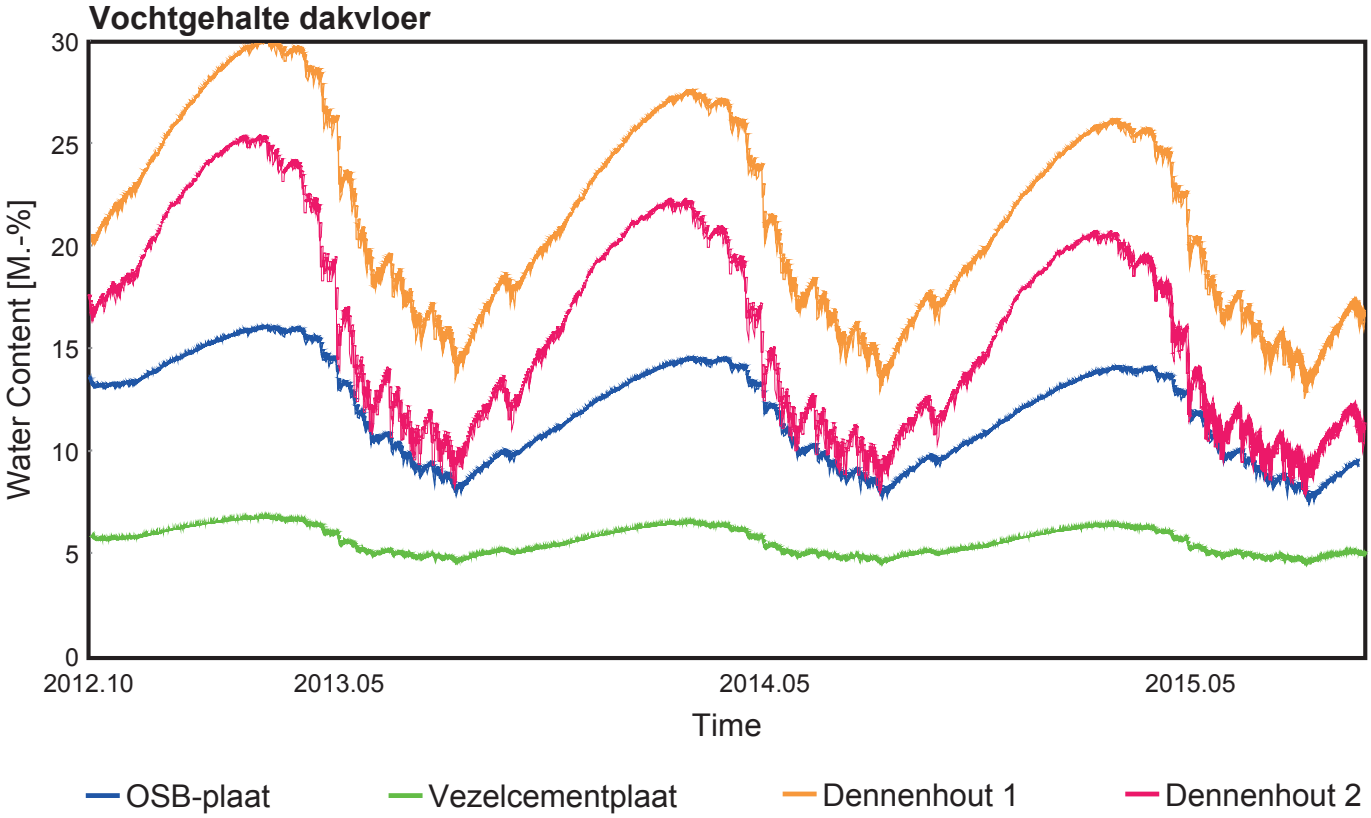
Dakopbouw : DB+

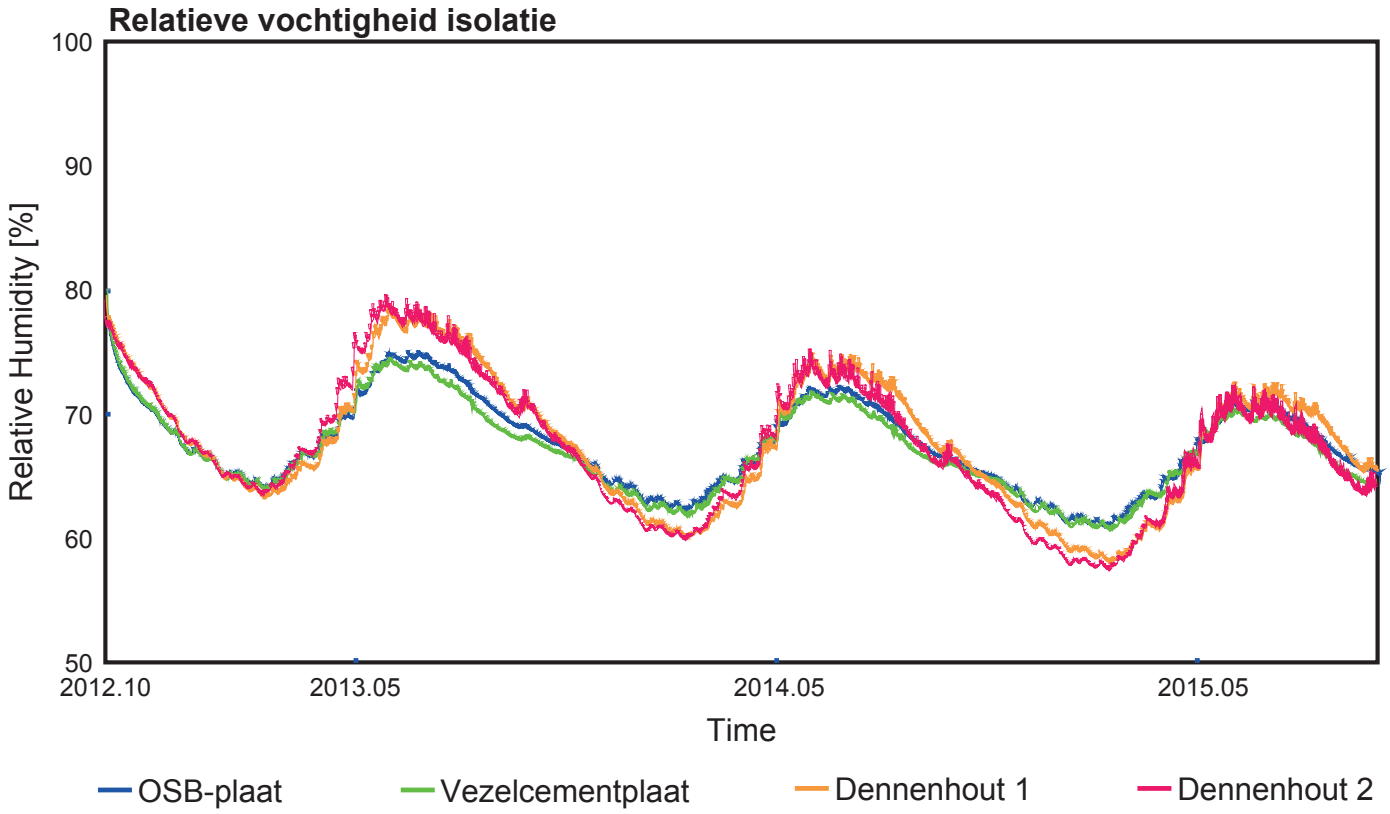




Andere dakvloeren

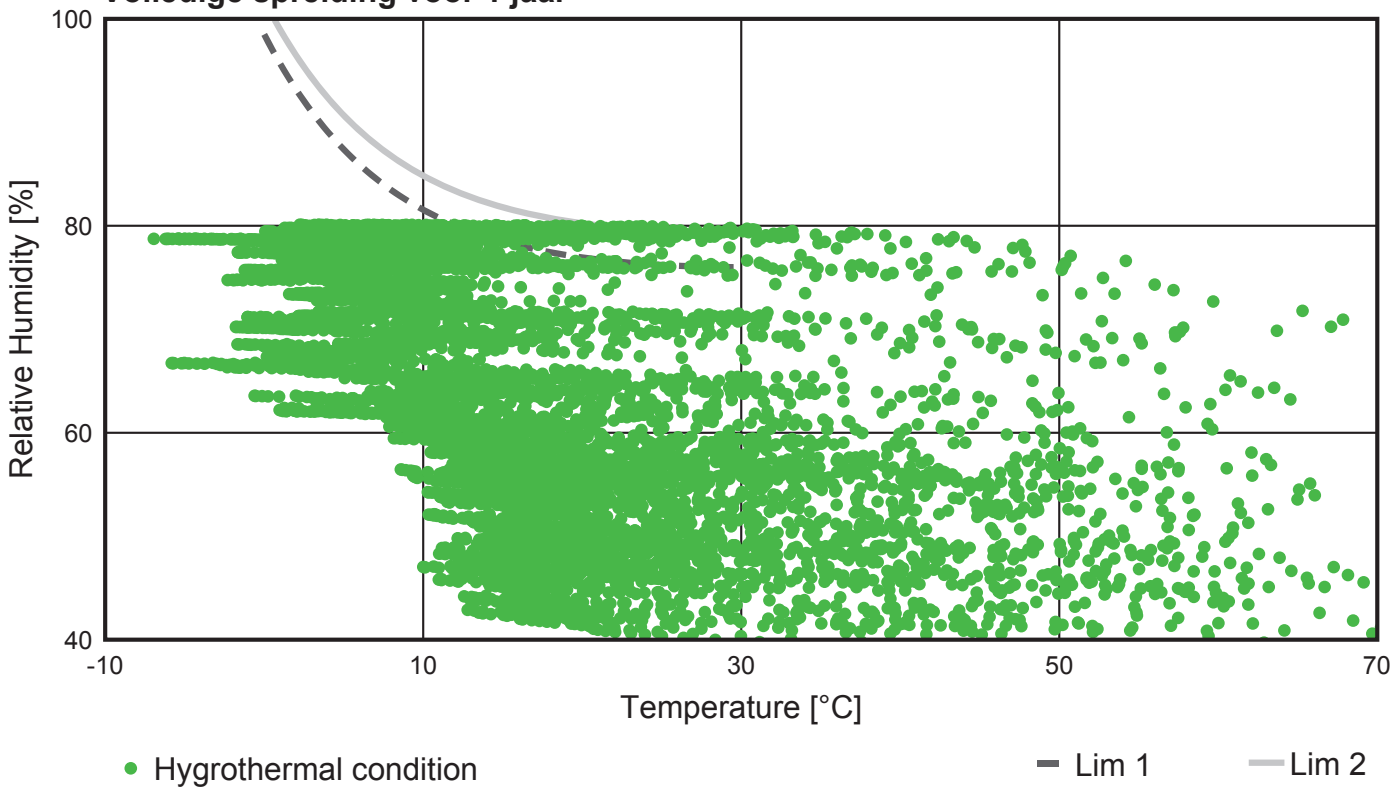
Dakopbouw : DB+

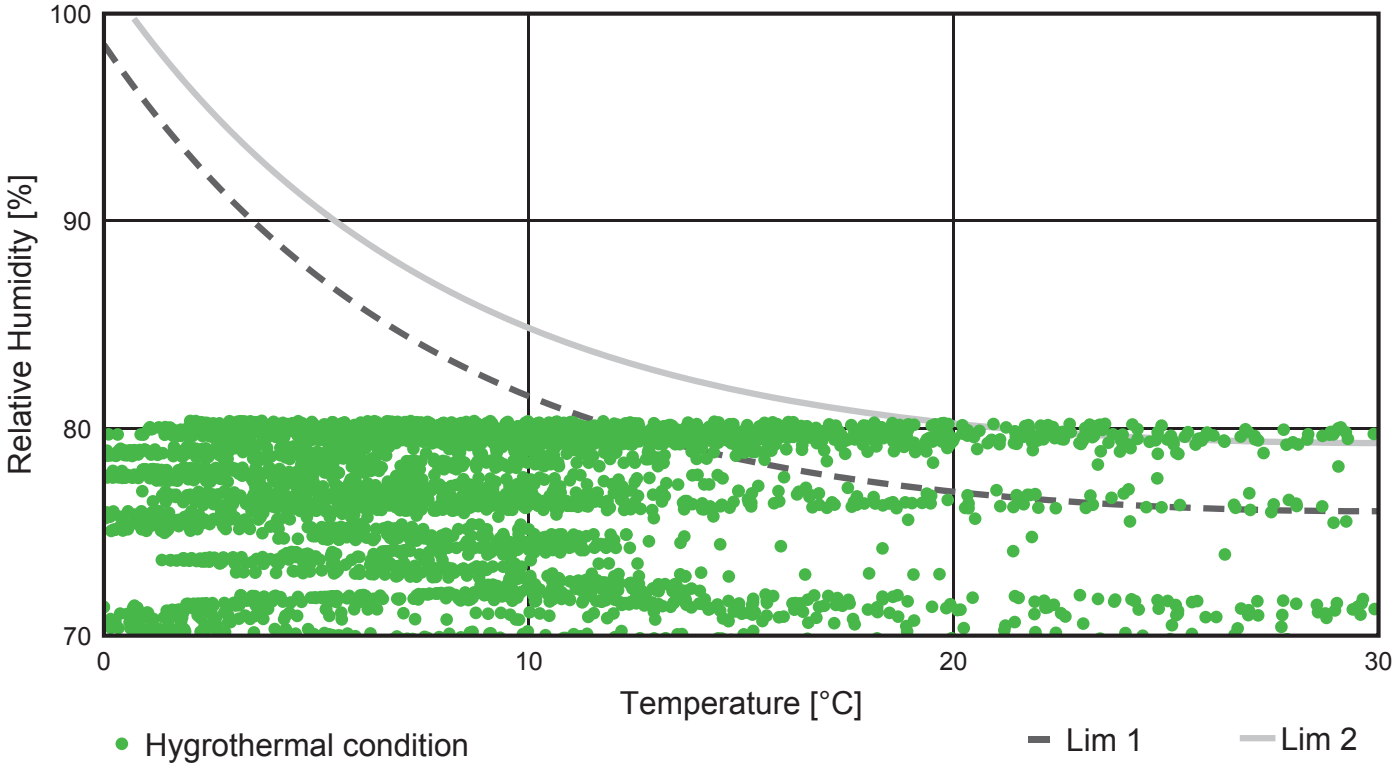




Isopleten dakvloer: OSB-plaat

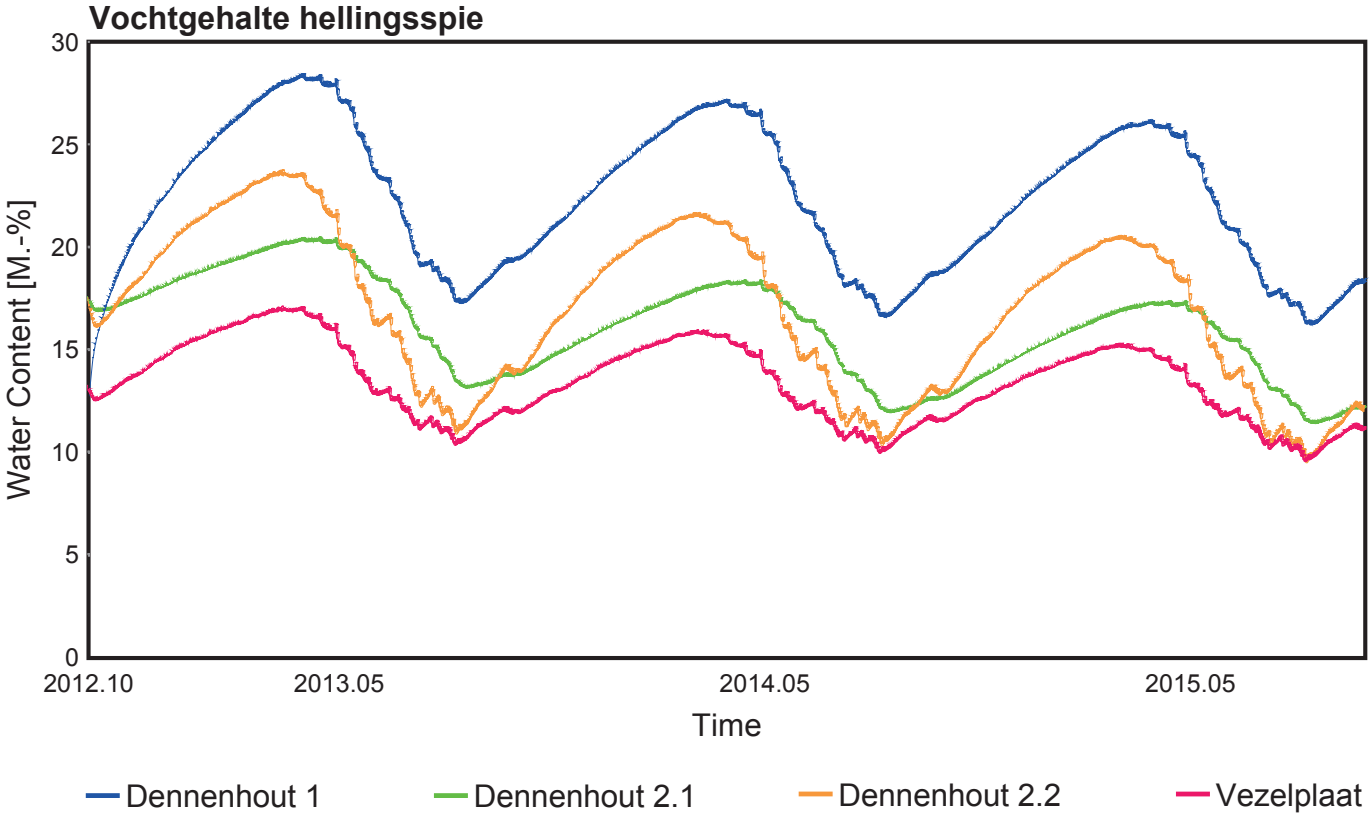
Volledige spreiding voor 1 jaar





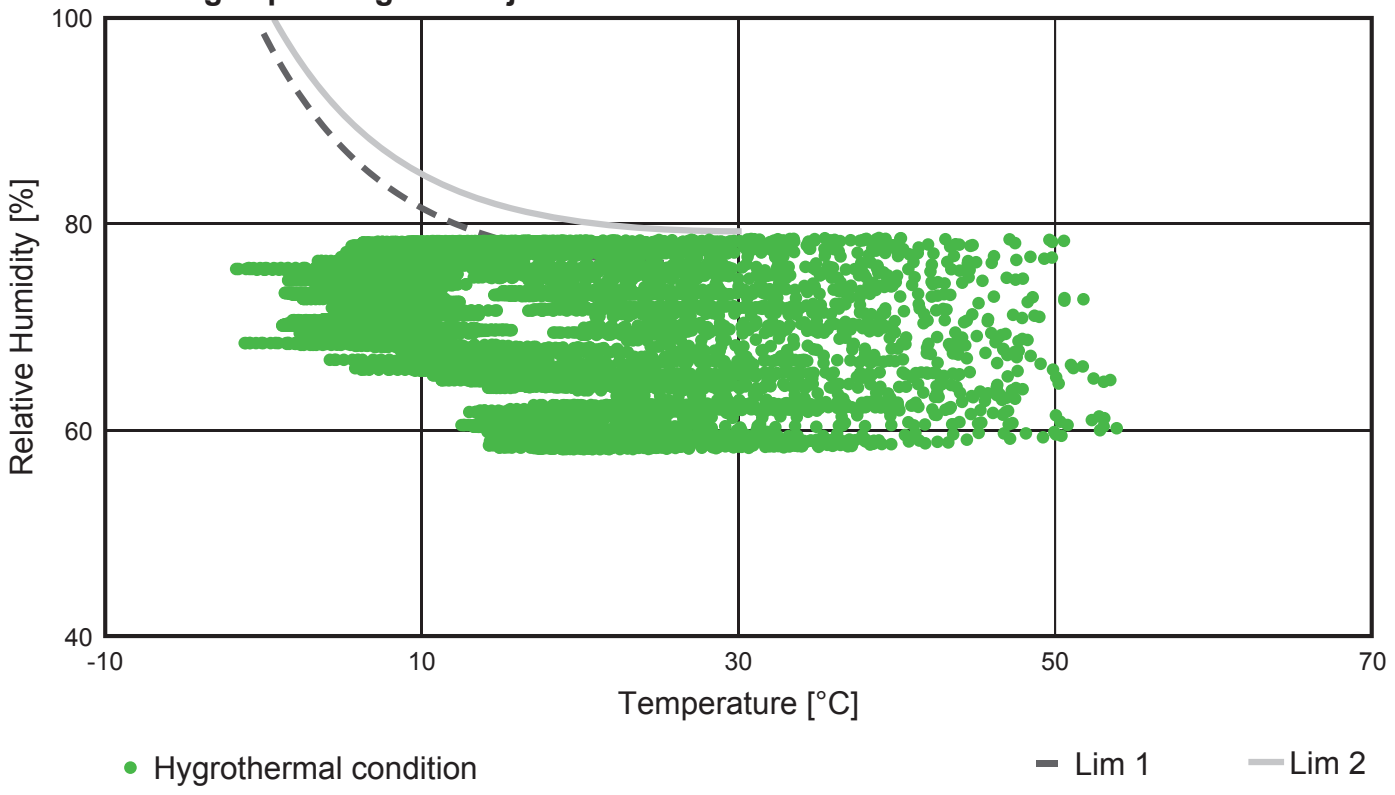
Andere hellingsspieën

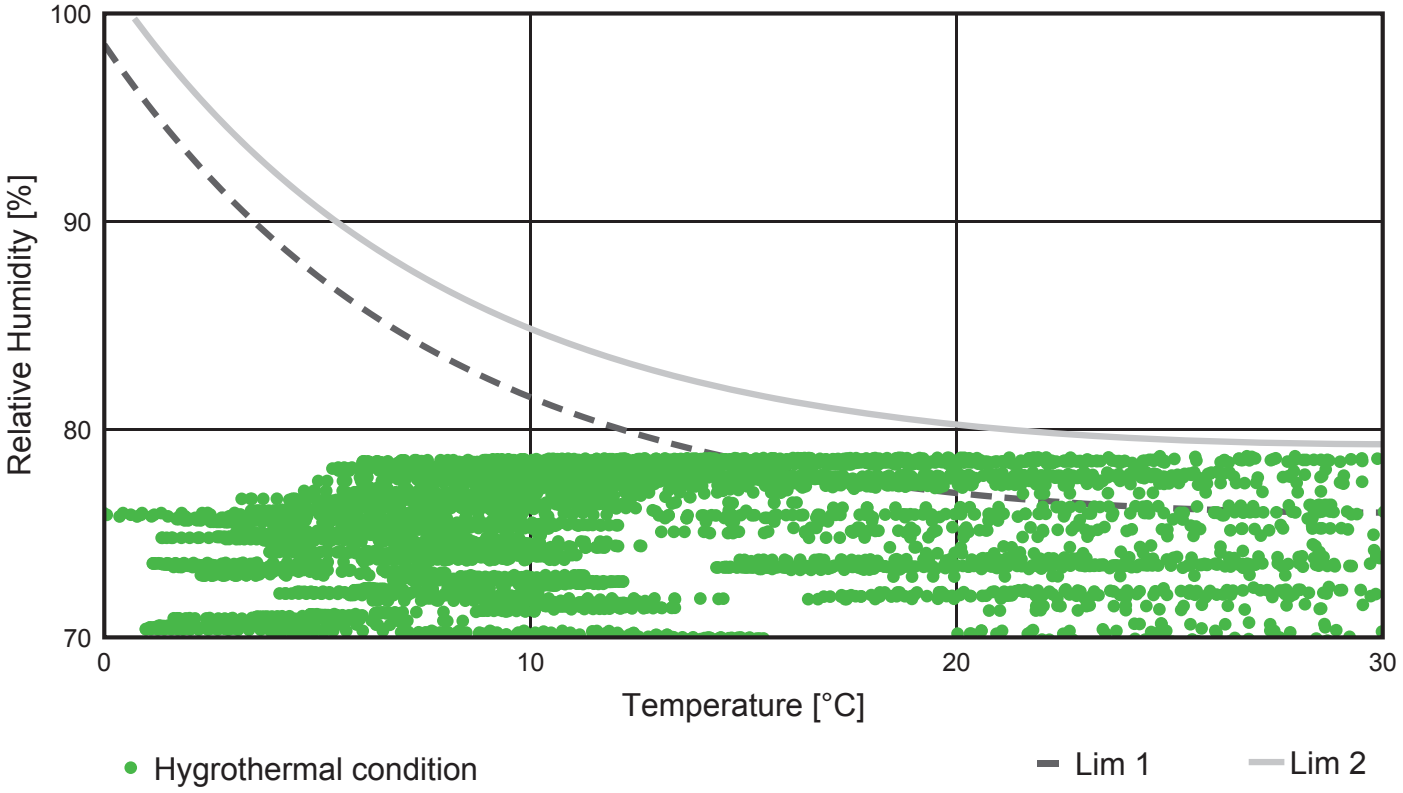
Dakopbouw : DB+



Isopleten hellingspieën: Spruce,radial

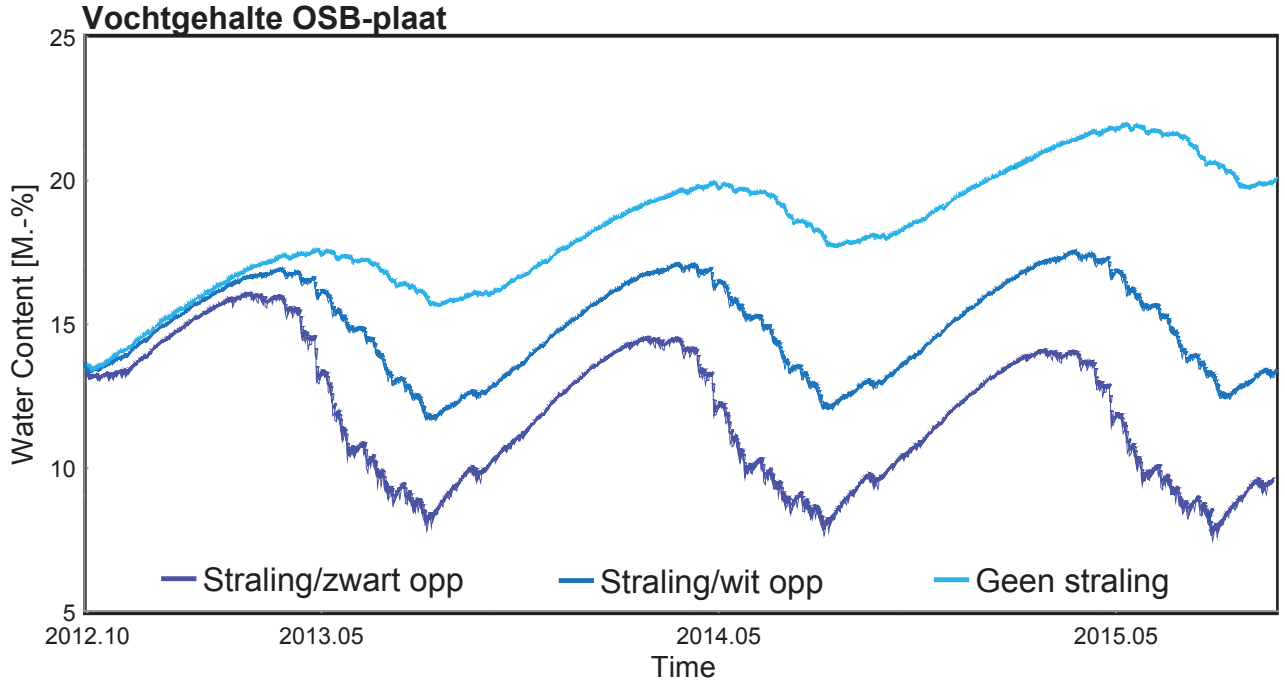
Volledige spreiding voor 1 jaar

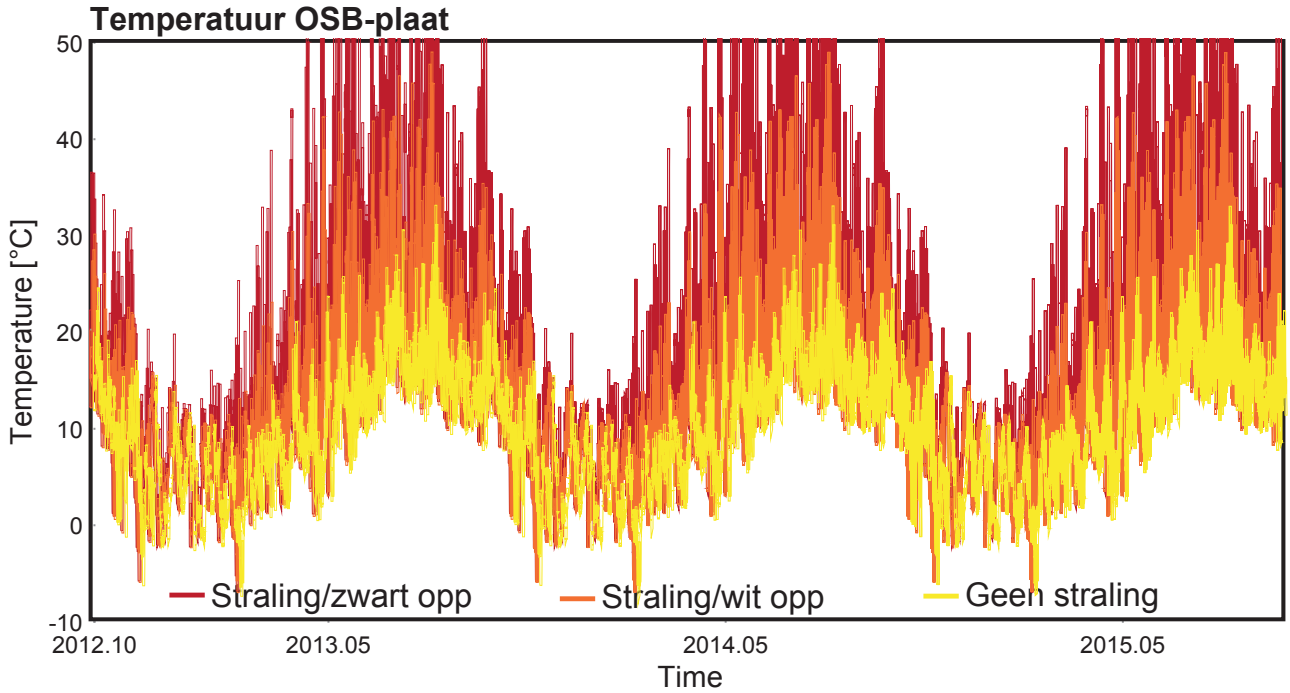


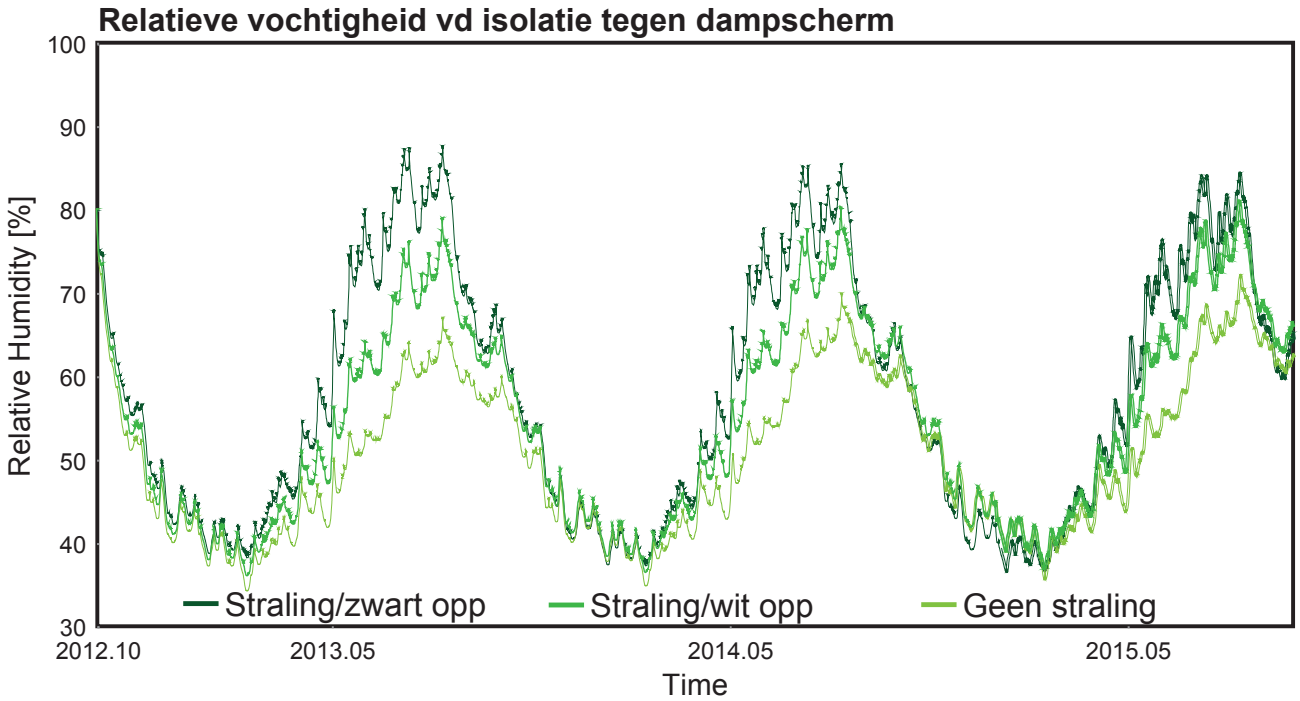


Beschaduwing

Dakopbouw : DB+ Isofloc

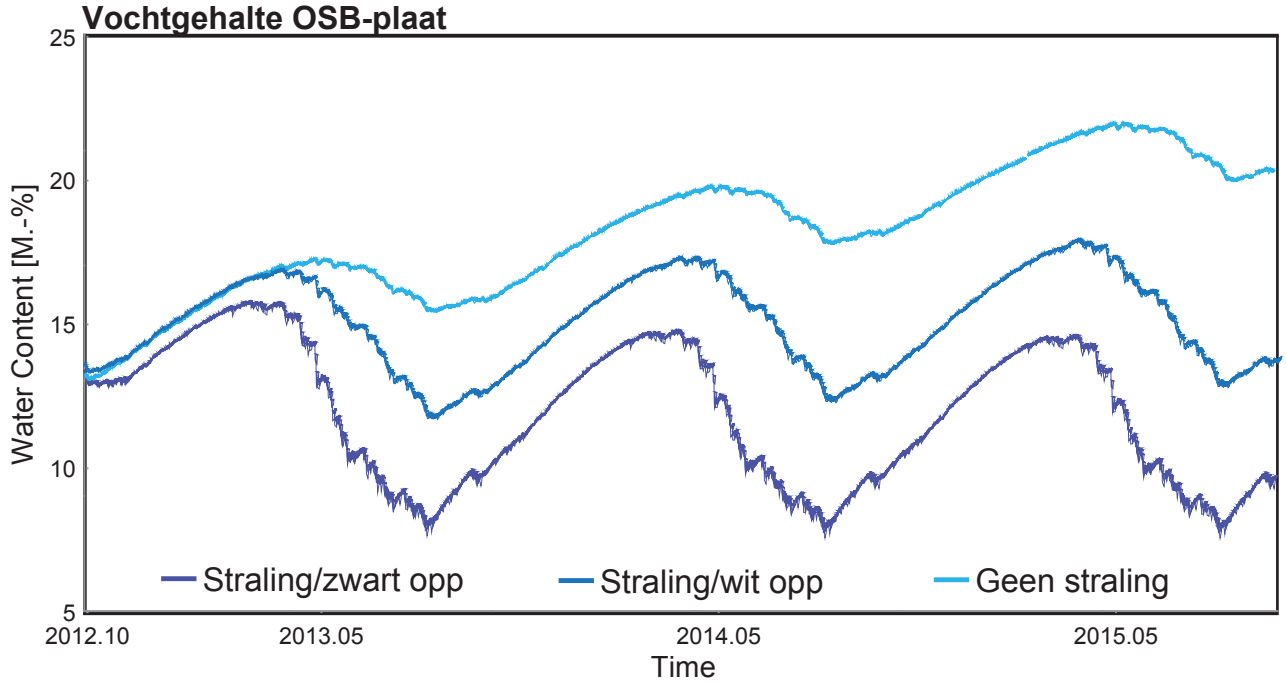


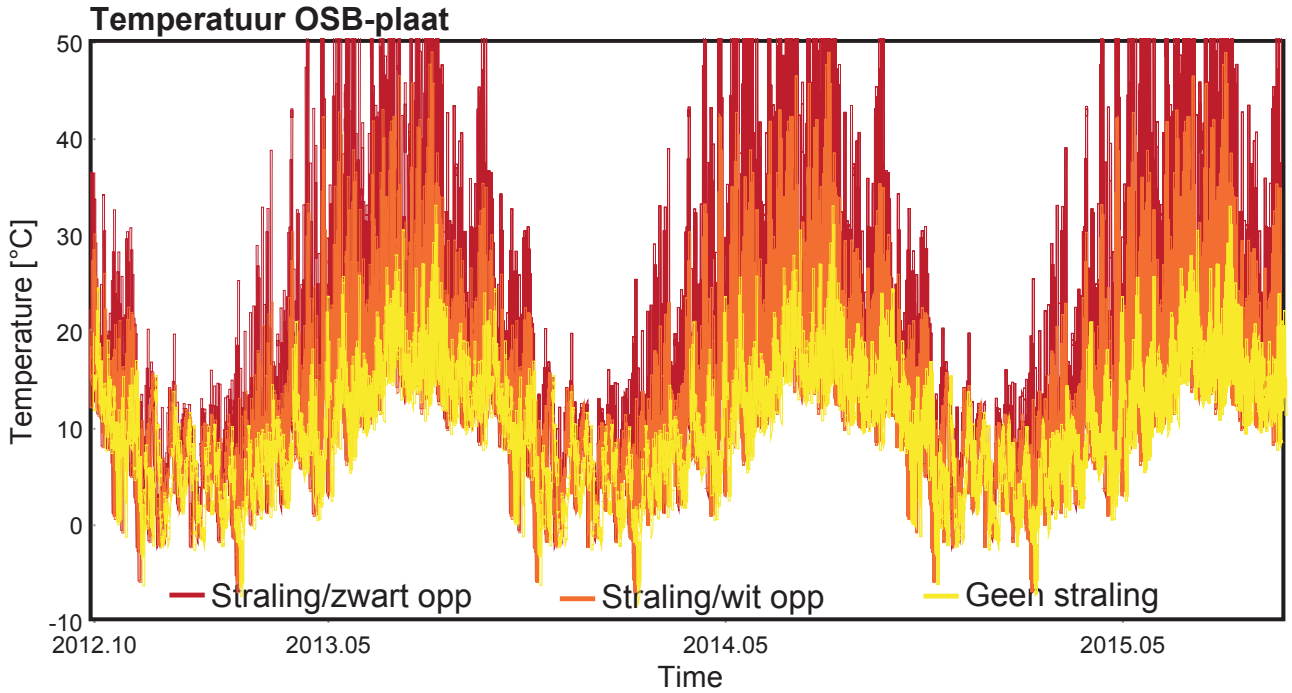


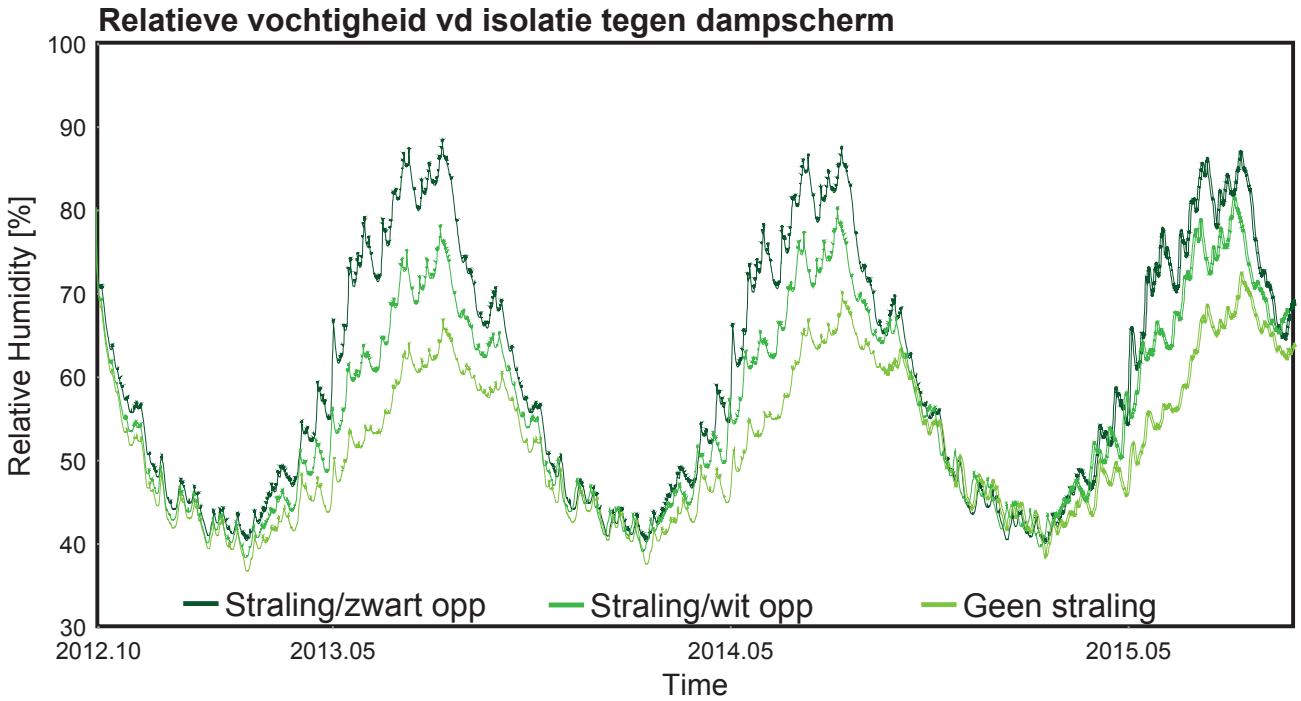


Beschaduwing

Dakopbouw : OSB Isofloc

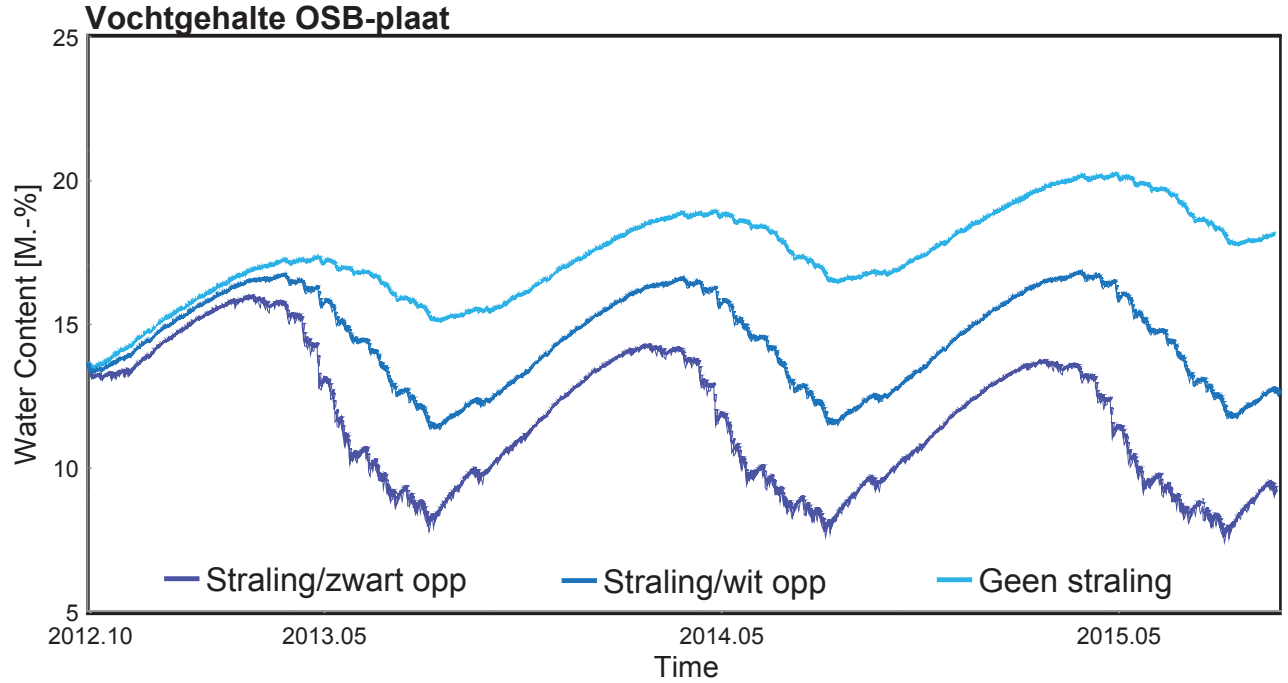


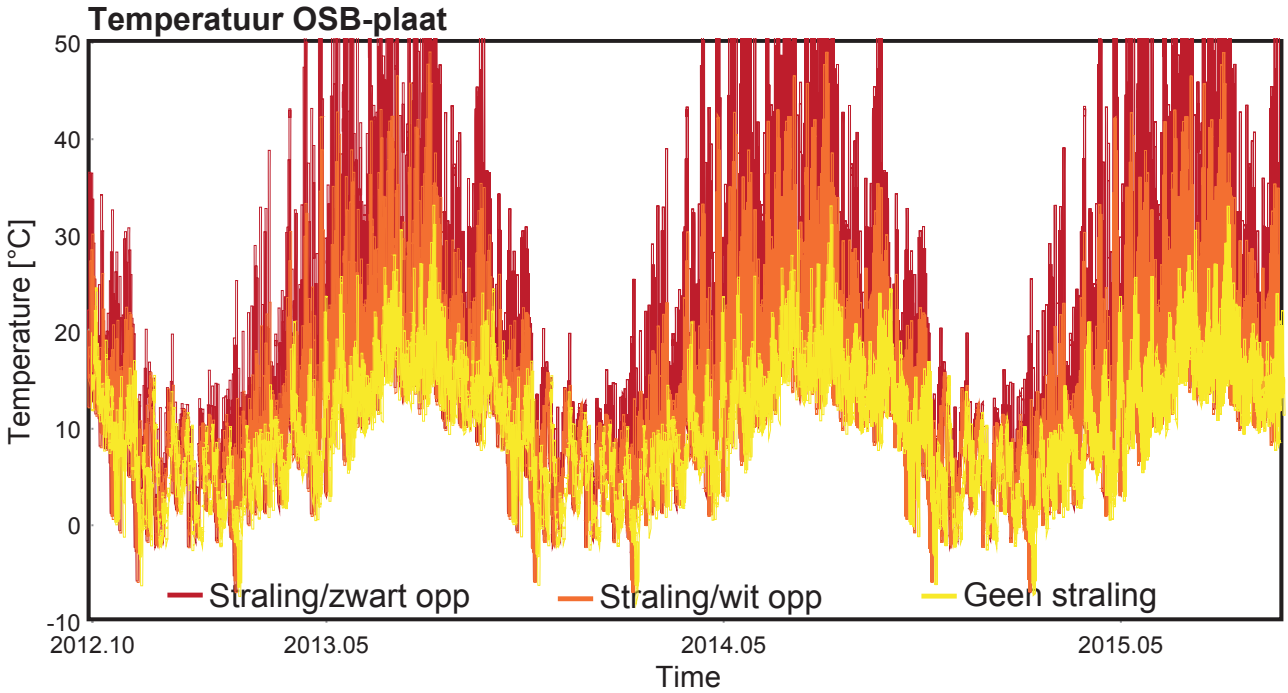


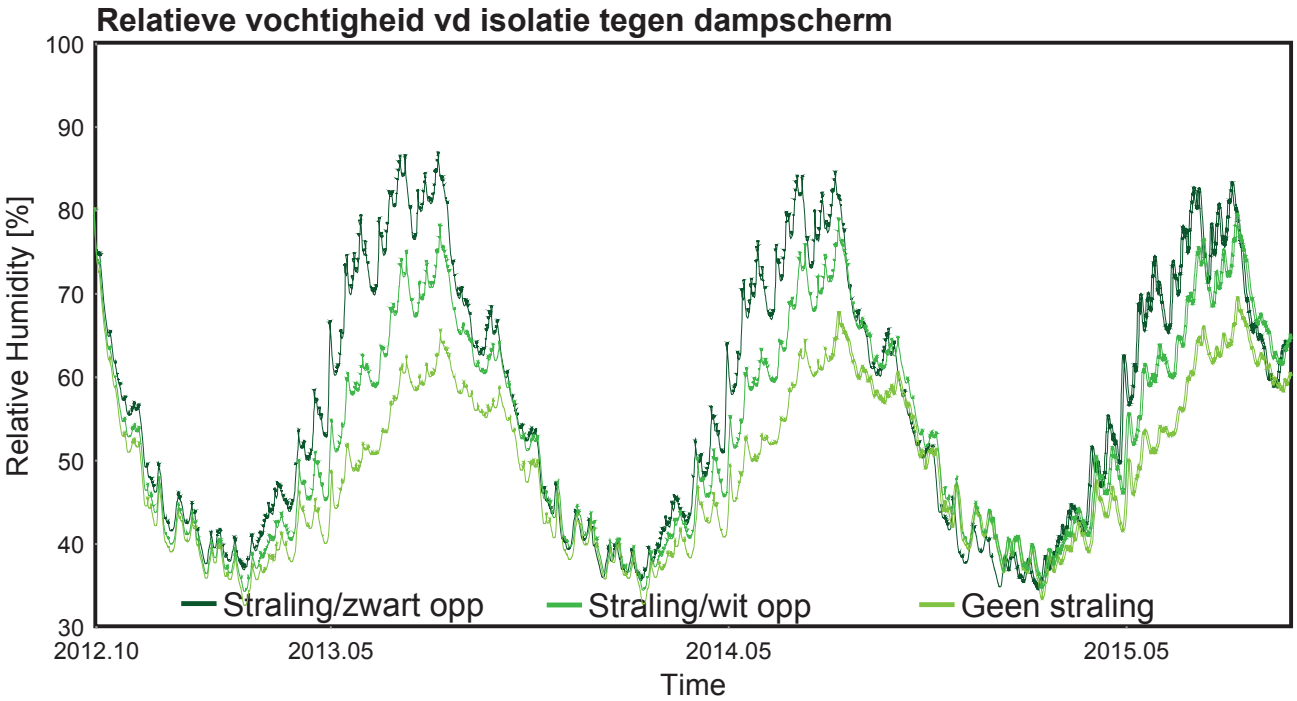


Beschaduwing

Dakopbouw : Intello Isofloc

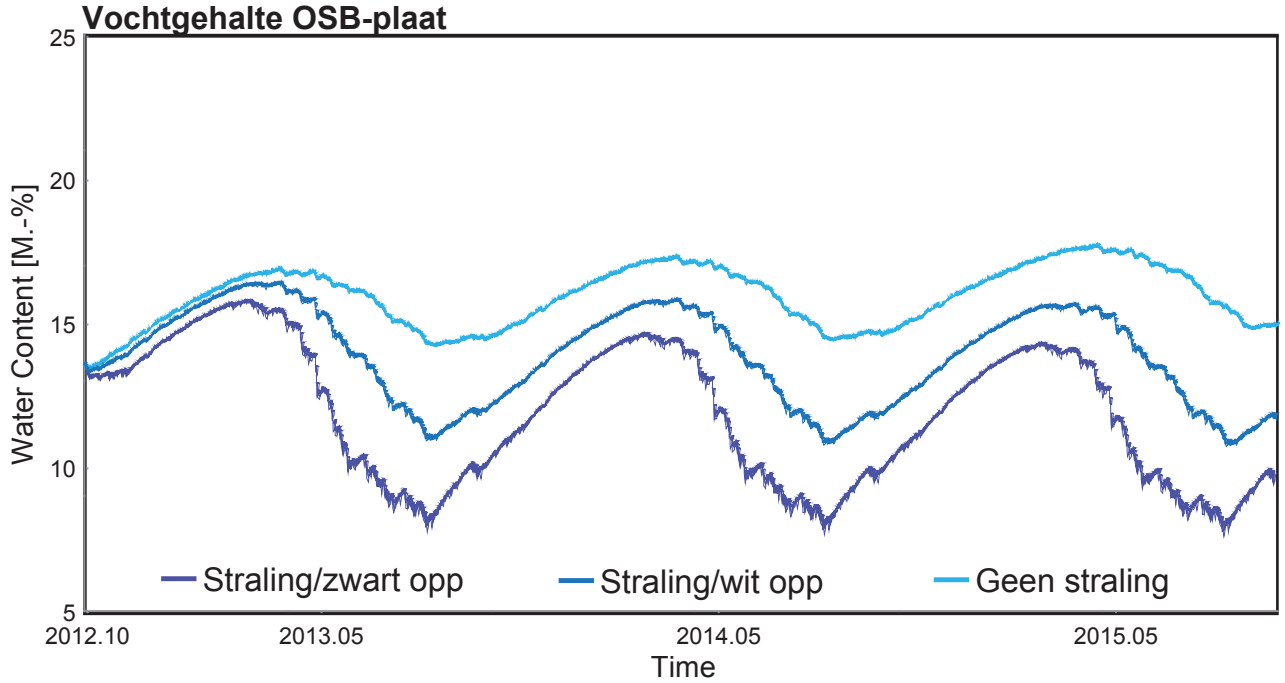


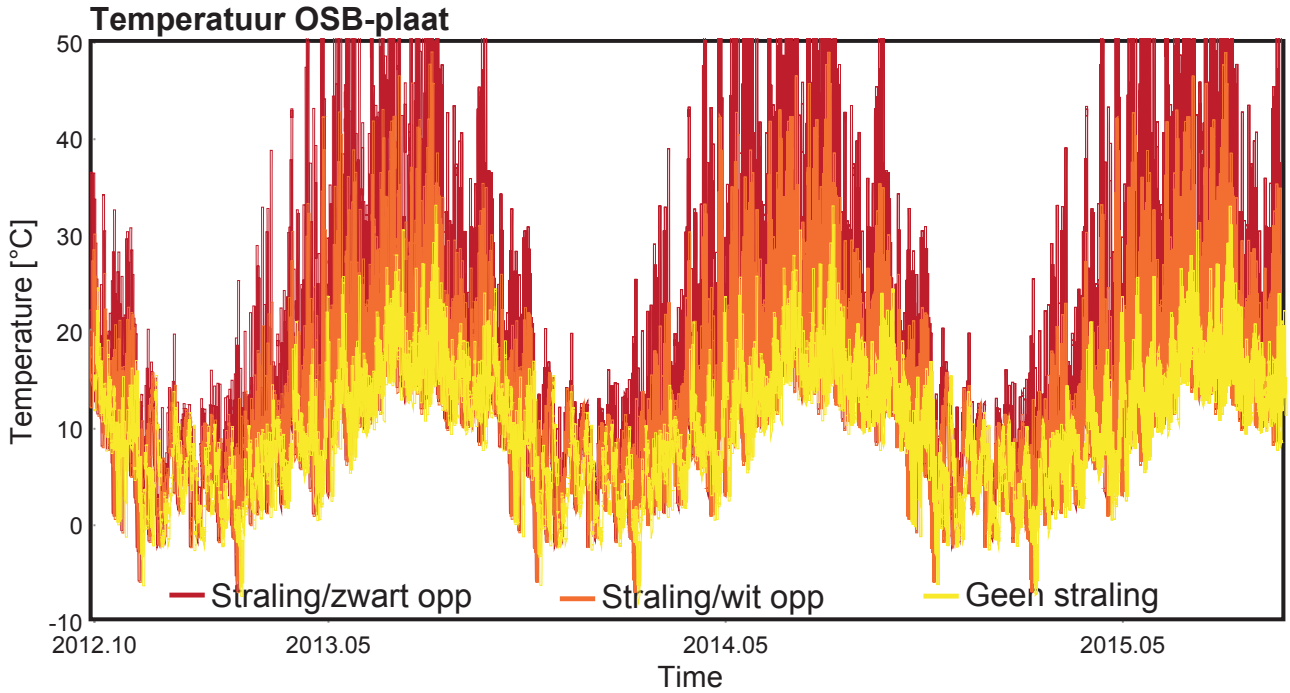


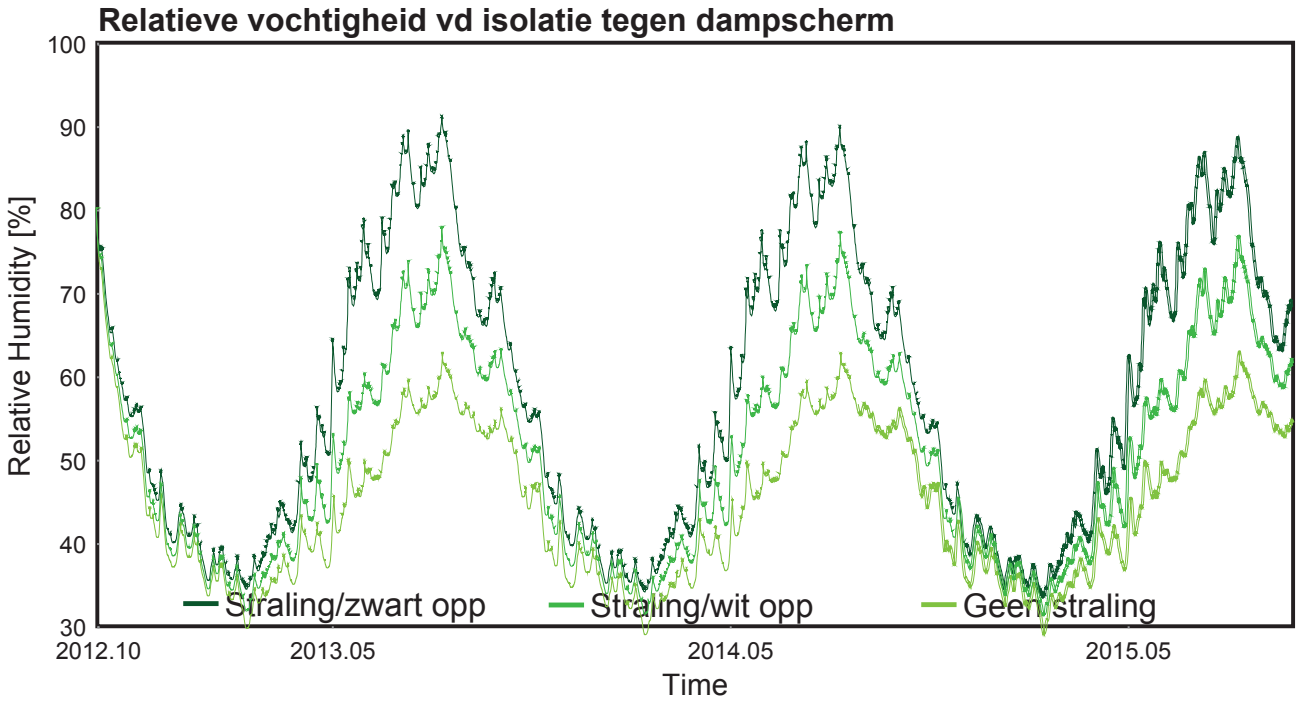


Beschaduwing

Dakopbouw : PE-folie Isofloc

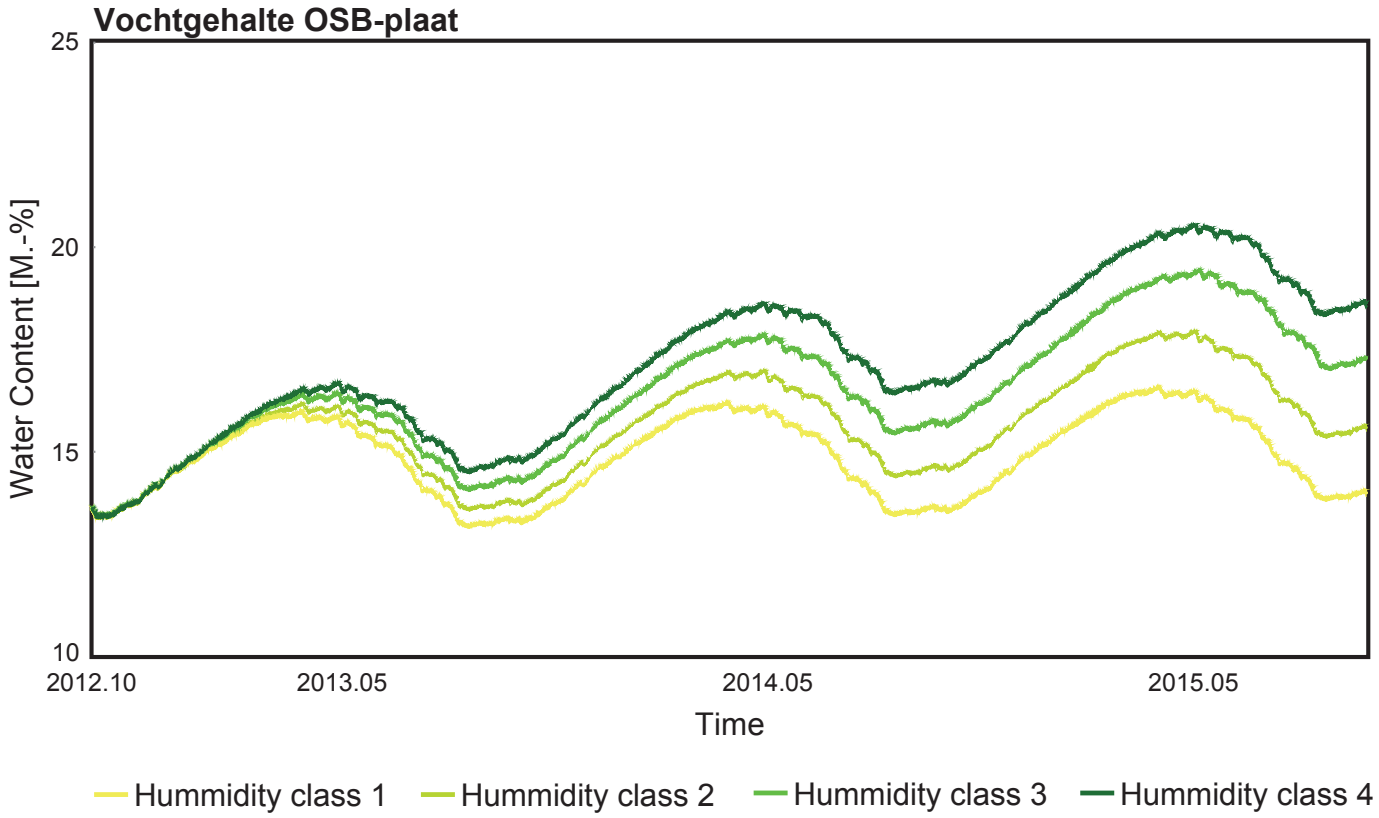




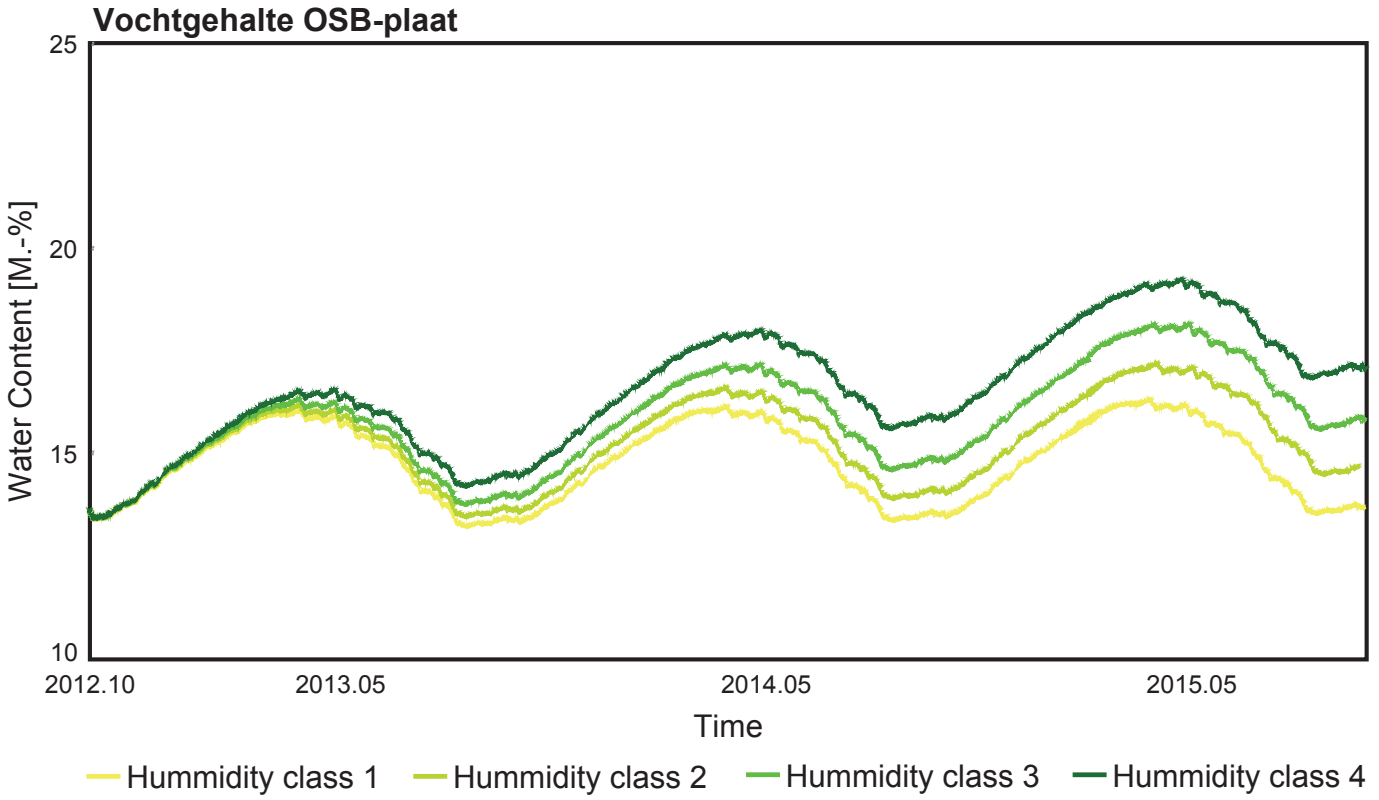


Beschaduwing

Dakopbouw : OSB Isofloc

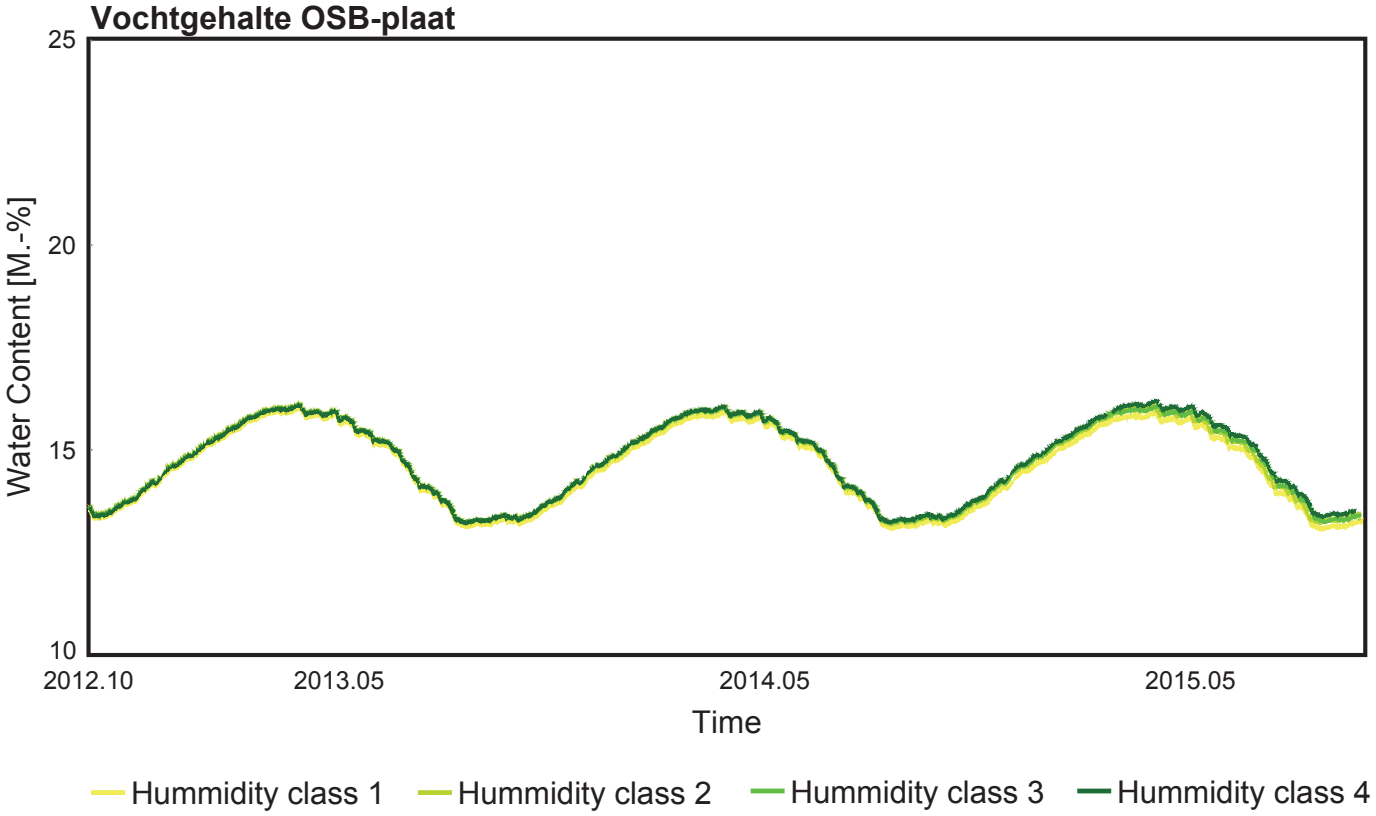


Dakopbouw : Intello Isofloc



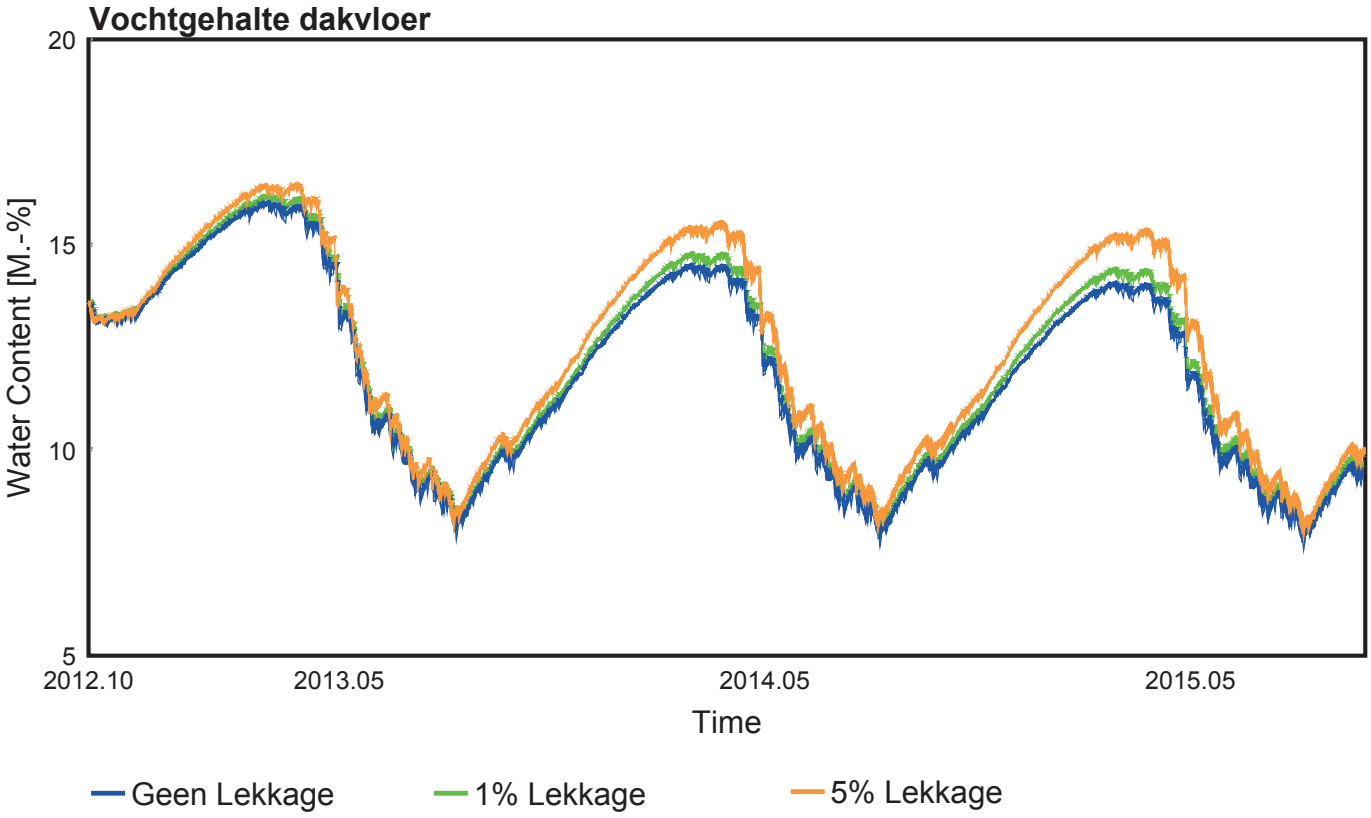
Beschaduwing

Dakopbouw : PE-folie Isofloc

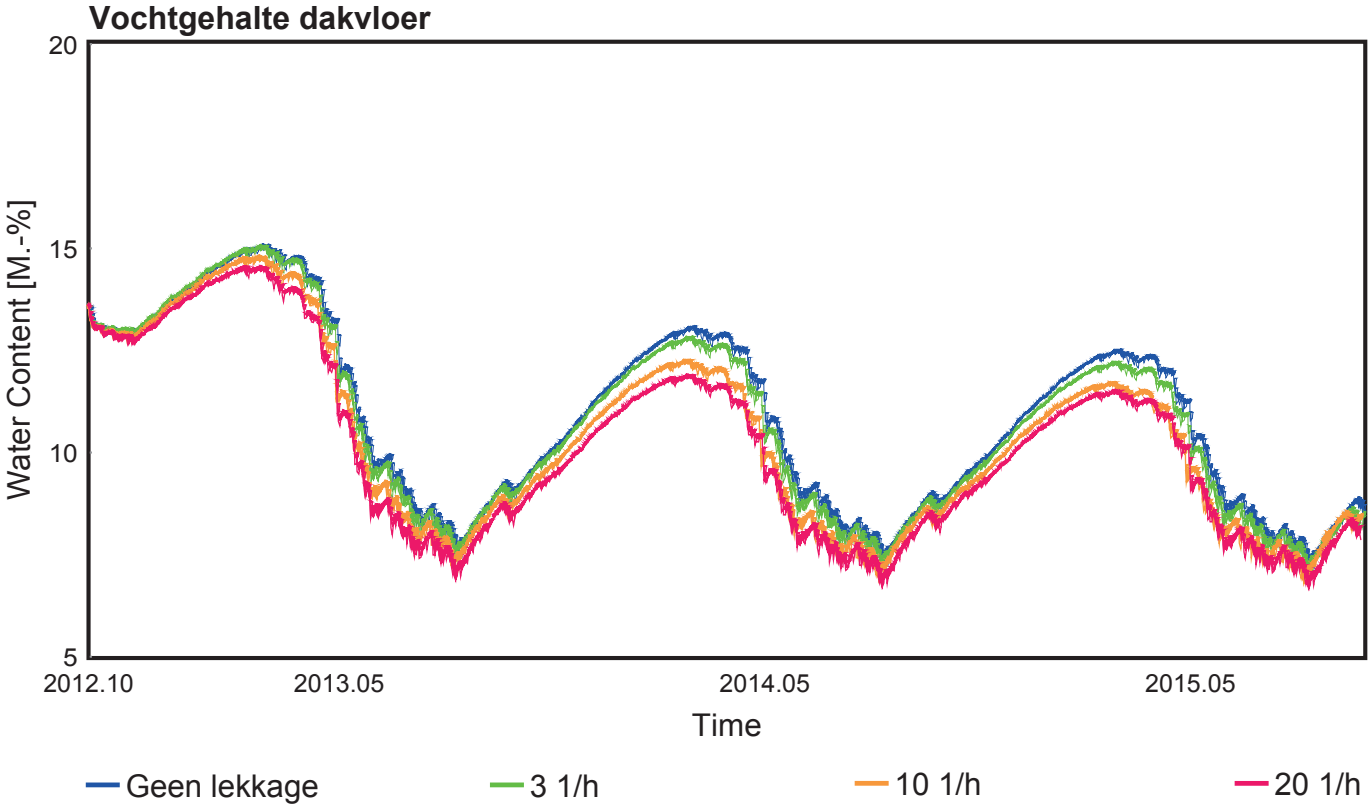


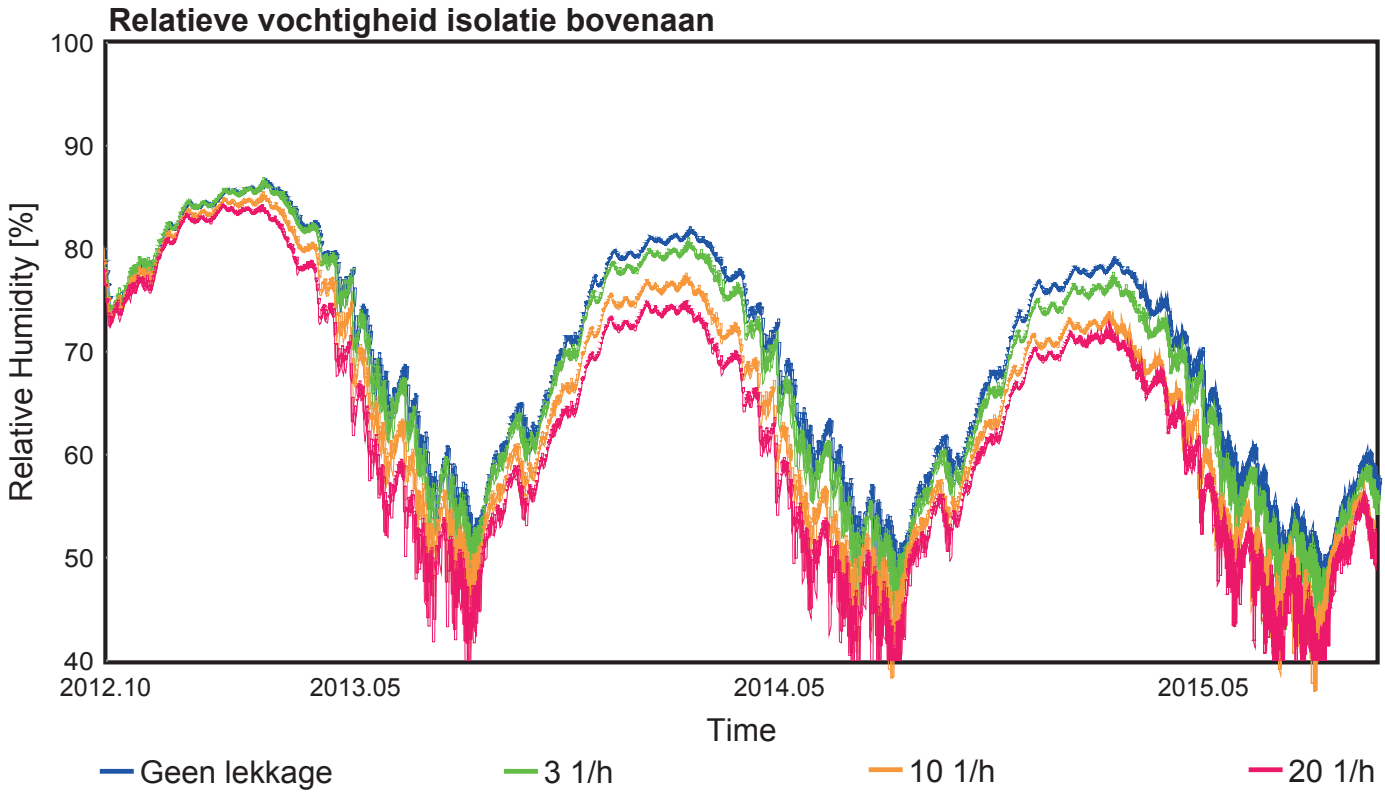
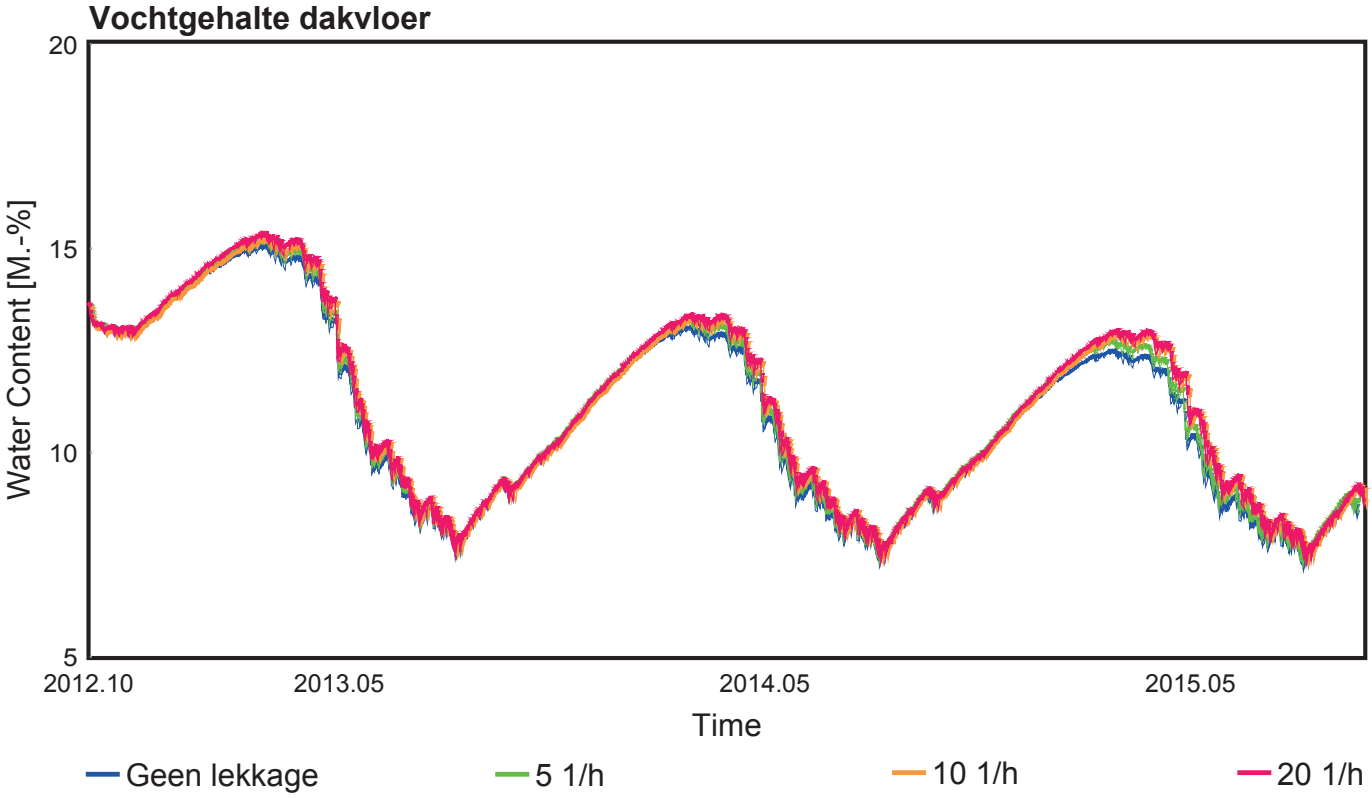
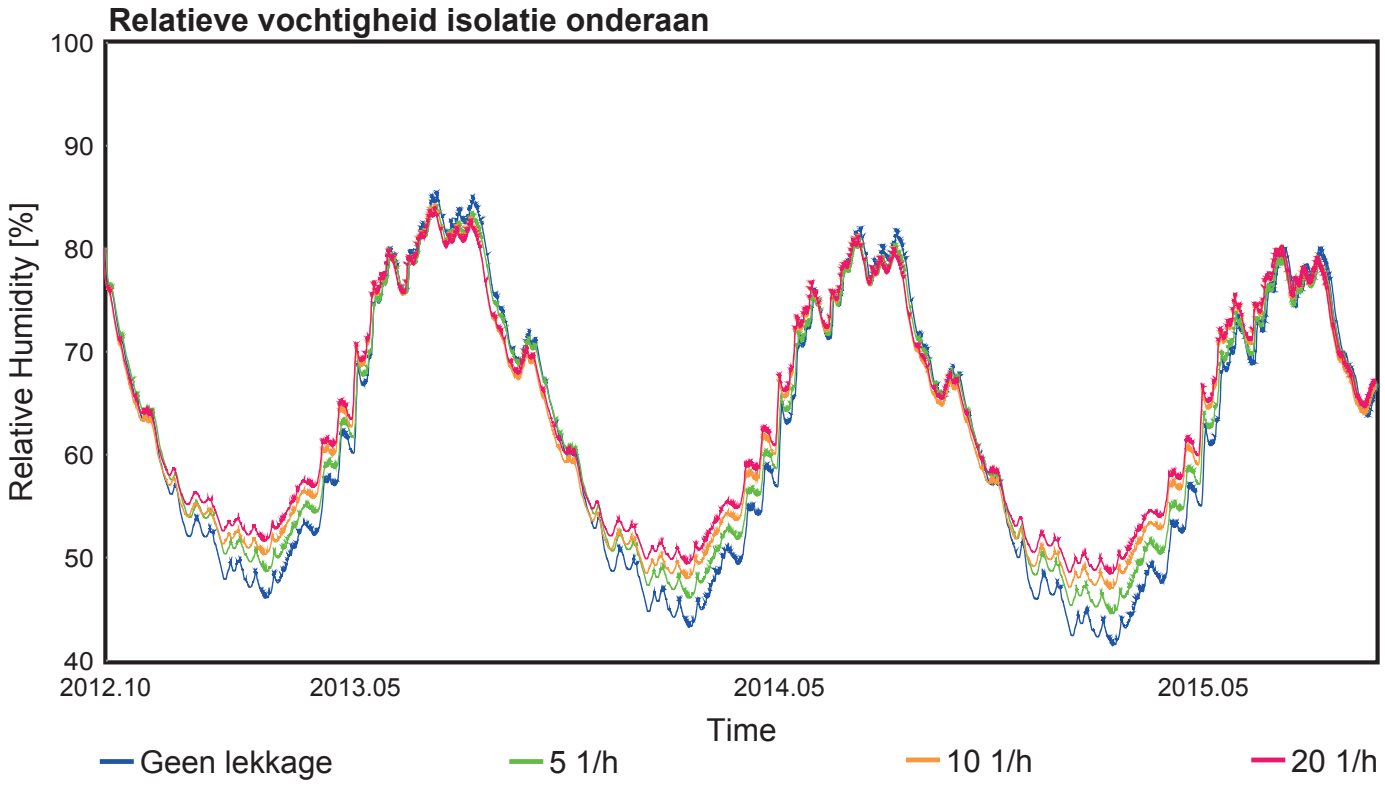
Lekkage: Vochtbron

Dakopbouw : DB+



Lekkage: Luchtstroom boven isolatie Dakopbouw : Intello





Lekkage: Luchtstroom onder isolatie Dakopbouw : Intello