



WUFI はEN 15026のベンチマークテストに適合

WUFI は欧州規格EN 15026 に定められている必要事項を満たし、ベンチマークテストに合格している。:

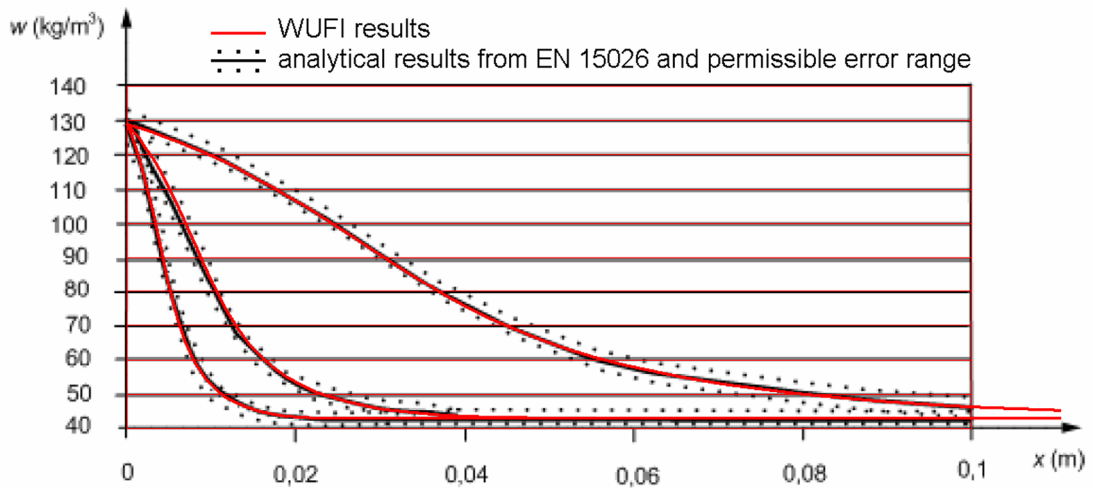


Figure A.1 — The moisture distribution at 7 days, 30 days and 365 days
(background image: EN 15026)

図A.-1: 7日後、30日後、365日後の含水率分布 (背景の図: EN 15026)

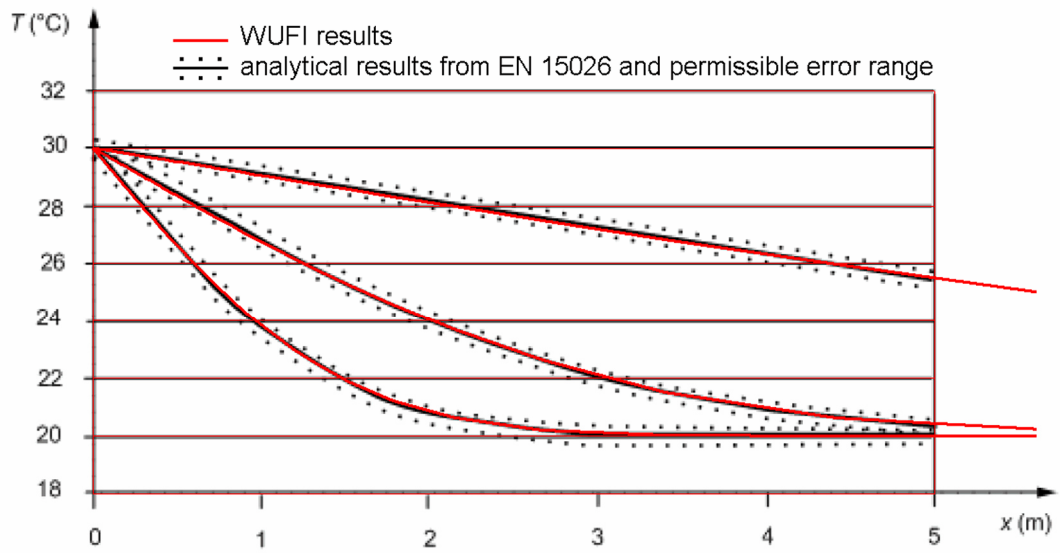


Figure A.2 — The temperature distribution at 7 days, 30 days and 365 days
(background image: EN 15026)

図A.-2: 7日後、30日後、365日後の温度分布 (背景の図: EN 15026)

EN 15026 に定められているベンチマークテストでは、ある均一の、半永久的に伸びている材料が、はじめは一定の周辺環境 ($\theta = 20^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 50\%$) と平衡状態にある状態から、周辺環境が $\theta = 30^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 95\%$ に変化した場合を想定し、熱と湿気を連立させたシミュレーションを行い、材料内部の熱と湿気の挙動を試験するものである。周囲の温度と相対湿度が急に上昇することによって、材料の内部に向かう熱と湿気の流れが生じる。ベンチマークテストでは、シミュレーションによって得られる、7日後、30日後、365日後の、材料内部の温度および含水率の分布を評価する。分布は、参照用の分布から2,5 %以上外れていてはいけない。

材料物性

ベンチマークテストに用いる熱湿気物性は規格の中に定められている。湿気依存の物性は、WUFIの中に表として入力するのに適した形式となっている。透湿率および水分輸送係数は、WUFIで用いる輸送モデルに適するように換算する必要がある。

基本物性

乾燥状態の熱容量(単位体積あたり)は、

$$\rho_0 \cdot c_0 = 1.824 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$$

WUFI は密度 ρ_0 および比熱 (単位質量あたり) c_0 をそれぞれ入力する必要がある。両項目をかけあわせた値 $\rho_0 \cdot c_0$ が合っている限り、個別の値は恣意的な値を与えることができる。ここで、

$$c_0 = 850 \text{ J/(kg K)} \text{ (鉱物性の建材の標準的な値)}$$

とすると、

$$\rho_0 = 2146 \text{ kg/m}^3.$$

規格では、空隙率を、建材の最大含水率が平衡含水率曲線 ($u_f = 146 \text{ kg/m}^3$, 下記参照) の最大値と一致するように設定することを指定しているため、

$$\text{空隙率} = 146 \text{ kg/m}^3 / 1000 \text{ kg/m}^3 = 0.146$$

熱伝導率は湿気依存として下記のように与える：

$$\lambda = 1.5 + \frac{15.8}{1000} \cdot w$$

上記の式では、熱伝導率は含水率 w と線形関係がある。よって、WUFIには次のように、熱伝導率の湿気依存を2行の表で記述することができる。

$$\begin{aligned} \lambda(w = 0 \text{ kg/m}^3) &= 1.5 \text{ W/mK and} \\ \lambda(w = 146 \text{ kg/m}^3) &= 1.5 + 15.8 / 1000 \cdot 146 = 3.8068 \text{ W/mK} \end{aligned}$$

2行の間の値は、WUFIが自動的に線形補完を行って算出する。

平衡含水率曲線

ある材料の平衡含水率曲線は、毛細管状の空隙の中にある水の吸引圧力、または空隙の中の空気の相対湿度における平衡含水率を記述するものである。吸引圧力 p_{suc} と相対湿度 φ は、Kelvinの式によって換算することができる。：

$$p_{\text{suc}} = -R_{\text{H}_2\text{O}} \cdot T \cdot \rho_w \cdot \ln(\varphi)$$

p_{suc} : 毛細管吸引圧 Pa

ρ_w : 水の密度、 1000 kg/m³

$R_{\text{H}_2\text{O}} = R/M_w$: 水蒸気のガス定数, J/(kg K)

R : 理想気体定数、 8.314 J/(mol K)

M_w : 水のモル質量、 0.018 kg/mol

T : 温度、 K

φ : 相対湿度、 -

規格には、ベンチマークテストに用いる材料の平衡含水率曲線が表形式で定められており、また、オプションとして、毛細管吸引圧または相対湿度の関数としても与えられている：

$$w = \frac{146}{(1 + (8 \cdot 10^{-8} \cdot p_{\text{suc}})^{1.6})^{0.375}}$$

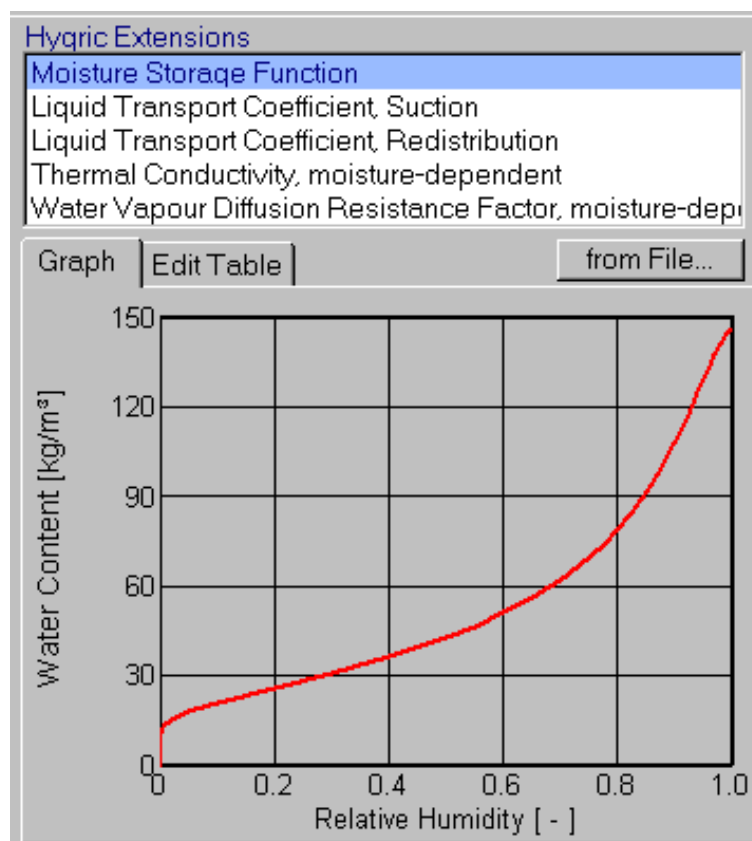
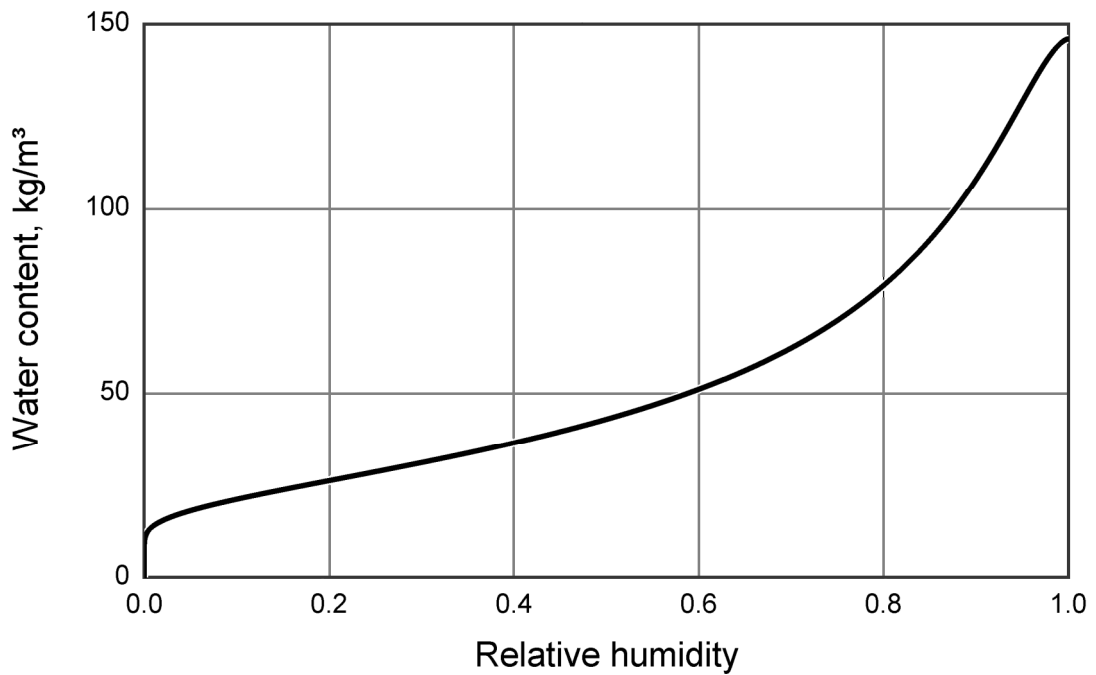
$$w = \frac{146}{(1 + (-8 \cdot 10^{-8} \cdot R_{\text{H}_2\text{O}} \cdot T \cdot \rho_w \cdot \ln(\varphi))^{1.6})^{0.375}}$$

- w** : 含水率、 kg/m³
p_{suc} : 毛細管吸引圧、 Pa
φ : 相対湿度、 -
T : 参照温度、 293.15 K

WUFIは相対湿度の関数として平衡含水率を扱うため、二つ目の式を用いる。WUFIでは、平衡含水率曲線の温度依存性は考慮しないため（計算モデルの簡易化として規格でも認められている）、式中の温度Tは、計算の間は変化せず、**293.15 K**の一定の値が用いられる。

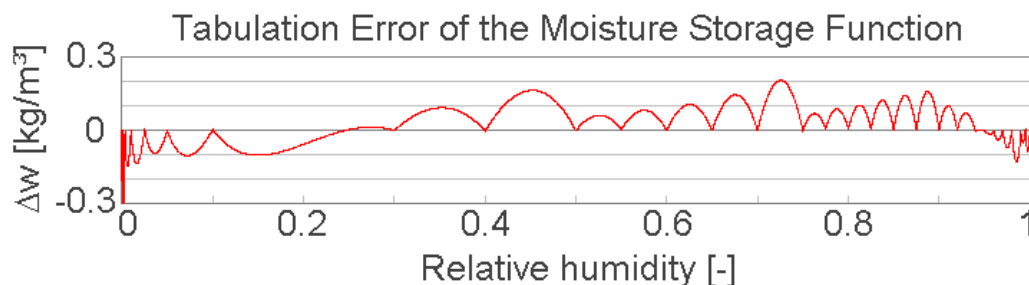
規格に定められている関数は、WUFIでは、表として入力する必要がある。表に記述されていない値は、WUFIが自動的に線形補完により算出する。よって表には、基となる関数との誤差ができるだけ小さくなるような点を重点的に記述する必要がある。特に、相対湿度の変化に対して平衡含水率が著しく変化する範囲においては、詳細なデータが必要となる。傾きの大きな範囲は、もとの曲線と、たとえ視覚的によく合っているように見えても、実際には、y方向の誤差が許容できないほど大きいことがある。以上の2点は、全ての、表として記述する曲線について言えることである。今回使用する平衡含水率曲線は、上記2つの注意点に関しては問題がない。

Moisture storage function



ベンチマークテストに用いた建材の平衡含水率を表で記述したところ、規定されている平衡含水率曲線との誤差は 0.3 kg/m^3 以下である。相対湿度の範囲

を、ベンチマークテストで生じる相対湿度の範囲（50 % と 95 %の間）に限定すると、その差は0.2 kg/m³以下である。



μ-値

建材中の水蒸気の流速 g_v はその場所における水蒸気圧 p の差 $\partial p/\partial x$ と線形関係がある。：

$$g_v = -\delta_p \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\delta}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}$$

建材固有の係数 δ_p は、拡散流速に与える全ての影響を含んでいる必要がある。つまり、空隙中の空気の温度および圧力、全体積に対する空隙の体積の割合、空隙の大きさの分布、空隙の連続性、含水率などである。このような複雑な性質を記述する δ_p は、材料に依存しない空隙中の空気の影響と、材料に依存する空隙構造による影響の、ふたつに分けることによって、より簡便に扱うことができる。：

$$\delta_p = \frac{\delta}{\mu},$$

δ_p ： 材料の透湿率、kg/(m s Pa)

δ ： 静止空気の透湿率、kg/(m s Pa)

μ ： 透湿抵抗比、-

WUFI は上記の関係を用いる。これにより、材料固有の透湿抵抗比 μ のみ（場合によっては湿気依存で）の入力が必要となる。すると、下記の式を用いて、空隙中の空気の温度および圧力を考慮した、空隙中の空気の透湿率 δ が自動的に算出される。：

$$\delta = \frac{1.968 \cdot 10^{-7} \cdot (\vartheta + 273)^{0.81}}{P}$$

ϑ : 温度、°C

P : 大気圧、Pa

自動的に算出される δ と入力された μ -値を使って、WUFIは水蒸気拡散を算出するための δ_p を計算する。

ベンチマークテストの規格では、 μ -値の代わりに、材料固有の透湿率 δ_p が規定されている。 :

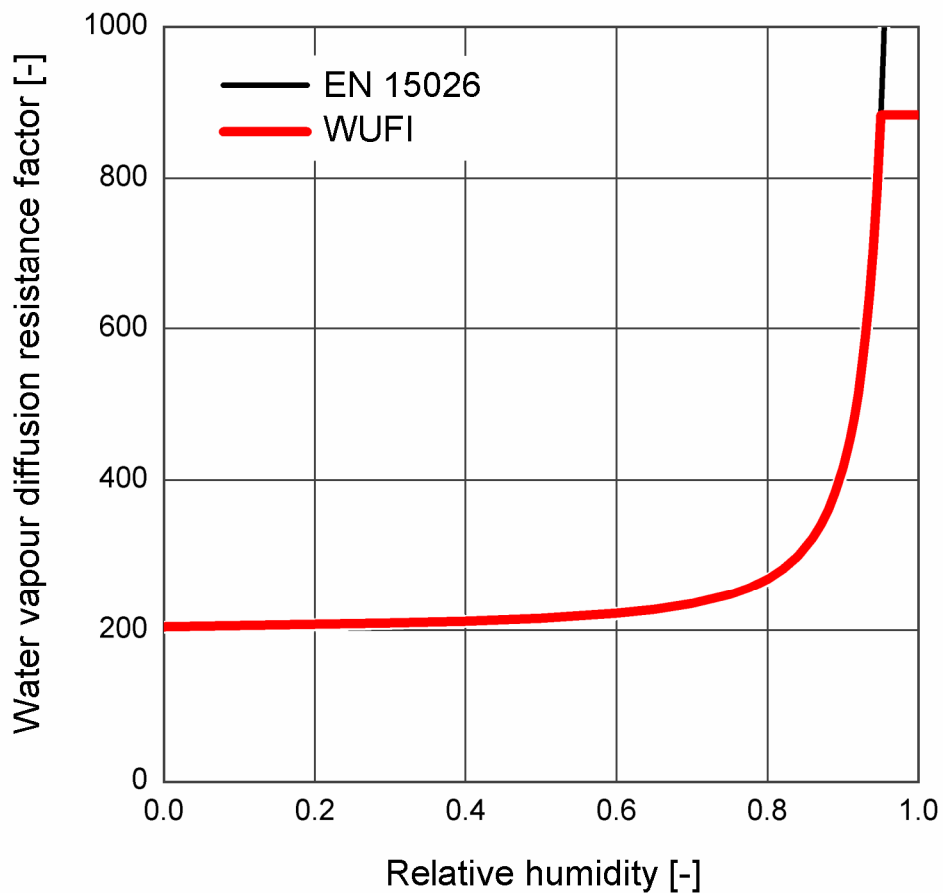
$$\delta_p = \frac{M_w}{RT} \cdot \frac{26.1 \cdot 10^{-6}}{200} \cdot \frac{1 - \frac{w}{146}}{0.503 \left(1 - \frac{w}{146}\right)^2 + 0.497}$$

上記の式では、WUFI が自動的に行うようには、空隙中の空気の温度および圧力が考慮されない。(上記の式中の温度 T は水蒸気密度を分圧に換算するためだけに用いられる。)

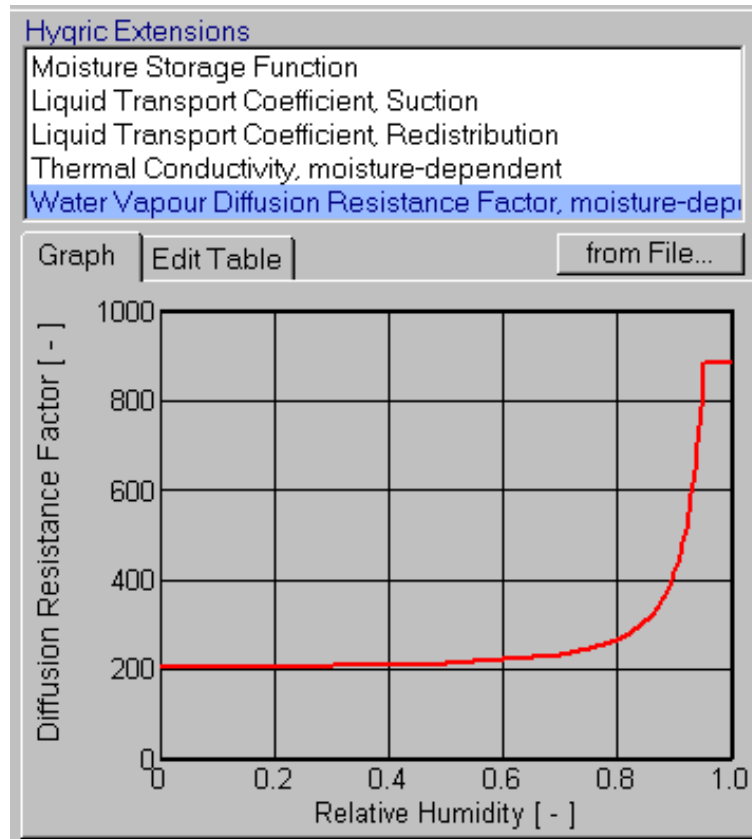
規格で定められている δ_p は、WUFI が、入力された μ -値を使って自動的に算出する δ_p が、できるだけ規定されている δ_p に近い値となるような μ -値に換算する必要がある。しかし、厳密に同等の値を求めることはできない。というのも、ひとつには、 δ_p から μ への換算には、一定の δ が用いられる(計算中の空隙の中の空気の温度および圧力を事前に知ることはできない) ことと、もうひとつは、WUFI が δ_p から μ への換算を行う過程で自動的に考慮する、温度と圧力の影響を絶つことができないためである。

妥協策として、 δ_p から μ への換算に、材料の中の平均的な状態として、代表的と考えられる温度と圧力、つまり $\vartheta = 25 \text{ °C}$ 、 $P = 101325 \text{ Pa}$ を与える方法がある。 :

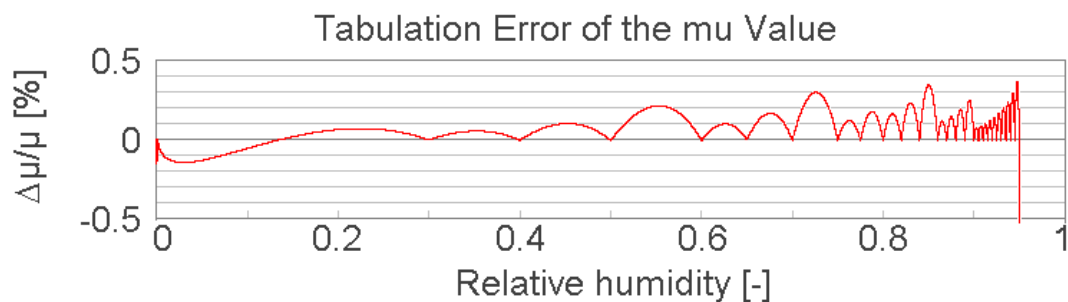
$$\mu = \frac{\delta}{\delta_p} = \frac{1.968 \cdot 10^{-7} \cdot (\vartheta + 273)^{0.81}}{P \cdot \delta_p} = \frac{1.968 \cdot 10^{-7} \cdot (25 + 273)^{0.81}}{101325 \cdot \delta_p}$$



規格で定められている関数 $\delta_p(w)$ は、自然飽和状態に至ると0となり、つまり μ は無限となる。勾配が著しく大きなカーブを記述するためには、ごく詳細な表への記述が必要となるが、WUFI では、 $\mu = \text{無限大}$ と与えることはできない。しかし、ベンチマークテストでは $\varphi = 95\%$ を超えることがないため、今回の計算においては、**95%** までの表への記述で十分である。



今回使用した表と、規格に定められている関数から換算される μ の曲線との相対誤差は、相対湿度が0から95%の間において、0.4%以下である。



水分拡散係数

WUFIは含水率 w の勾配 $\partial w/\partial x$ によって生じる、液水の毛細管輸送を次式によって算出する。

$$g_w = -D_w \cdot \frac{\partial w}{\partial x}$$

一方、EN 15026では次式を用いている。

$$g_w = K \cdot \frac{\partial p_{suc}}{\partial x}$$

(しかし、WUFI で使用している式と同等の結果を得られる。) ベンチマークテストに使用する材料の、湿気依存の水分伝達係数 K は、下記の関数によって与えられる。 :

$$K = \exp(-39.2619 + 0.0704 \cdot (w-73) - 1.7420 \cdot 10^{-4} \cdot (w-73)^2 - 2.7953 \cdot 10^{-6} \cdot (w-73)^3 - 1.1566 \cdot 10^{-7} \cdot (w-73)^4 + 2.5969 \cdot 10^{-9} \cdot (w-73)^5)$$

この関数から、WUFI で使用する水分拡散係数 D_w は、次式により換算する。

$$D_w = -K \cdot \frac{\partial p_{suc}}{\partial w}$$

上記の式の中の $p_{suc}(w)$ 関数は、平衡含水率関数 $w(p_{suc})$ の逆数である。ただ、相対湿度 φ の代わりに、吸引圧力 p_{suc} の関数として表現されている。(上述参照)。EN 15026 はこの逆関数を次式のように記述している。 :

$$p_{suc} = 0.125 \cdot 10^8 \cdot \left(\left(\frac{146}{w} \right)^{\frac{1}{0.375}} - 1 \right)^{0.625}$$

これを w について変換すると :

$$\frac{\partial p_{suc}}{\partial w} = -p_{suc} \cdot \frac{0.625}{1 - \left(\frac{146}{w} \right)^{-\frac{1}{0.375}}} \cdot \frac{1}{0.375 \cdot w}$$

EN 15026 は水分輸送の温度依存を無視してもいいとしている。よって、ベンチマークテストの参照解にも、上記の、温度に依存しない水分伝達係数を用いている。

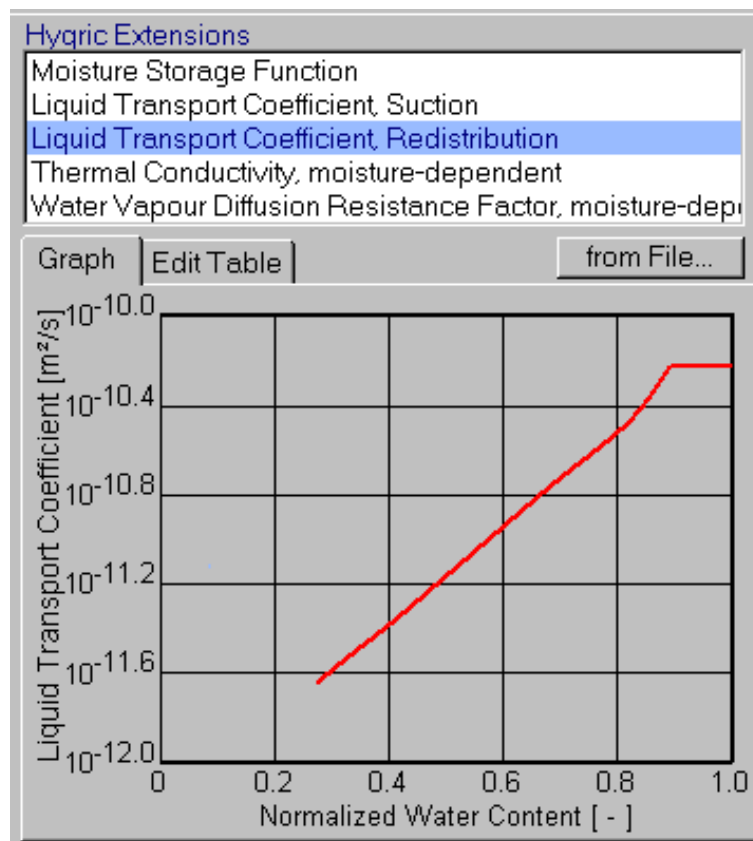
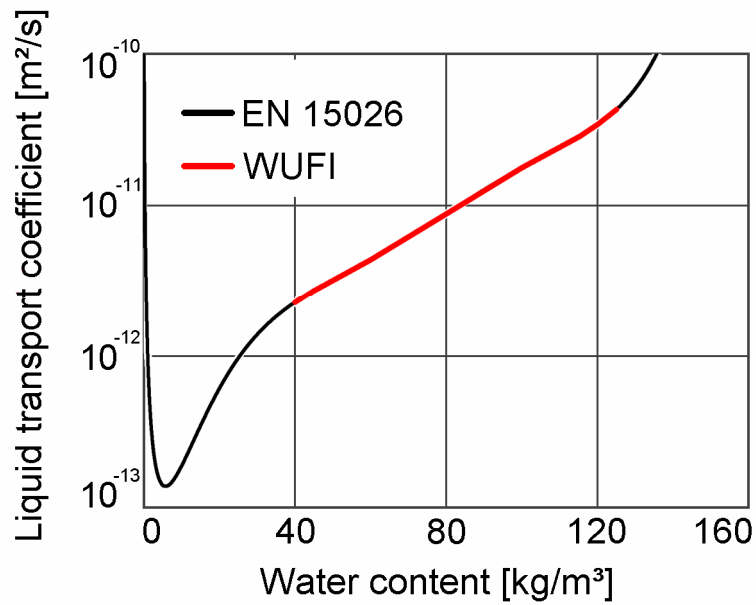
しかしWUFI は、水分拡散係数の温度依存を考慮する。これは主に、温度の上昇により毛細管の中の水の粘性が低下する現象である。このため、WUFI は、設定された水分拡散係数を20°C におけるものと想定し、次式によって各グリッド要素の温度に合わせた粘性係数を算出する。

$$\text{visfac} = 9.0 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta^2 + 0.0208 \cdot \vartheta + 0.555.$$

今回の計算においては、温度が30 °Cに達した範囲においてのみ、水分拡散が生じるため、予め、30 °Cにおける水分拡散係数を設定した。このためWUFI では、設定した水分拡散係数に、 $\text{visfac}(30 \text{ °C}) = 1.26$ という温度の修正ファクターをかけあわしたものが用いられる。こうして輸送係数が上昇することにより、吸収される水分量が $\sqrt{1.26}$ 倍だけ多くなり、ベンチマークテストの参照解（温度依存を考慮していない）との誤差が許容範囲を超えることにつながる。WUFI が自動的に行う、水分拡散係数の温度依存を絶つことができないため、今回の計算には、予め、水分拡散係数を1.26で割ったものを与えた。これにより、WUFIが自動的に温度依存を考慮して算出する水分輸送係数が、規格に定められている、温度依存を考慮しない水分伝達と同等になる。

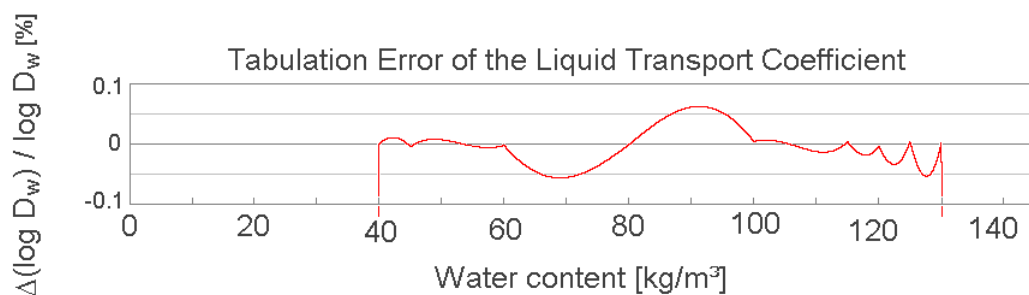
WUFI で用いる水分拡散係数は次式で算出される。

$$D_w = -K \cdot \frac{\partial p_{suc}}{\partial w} \cdot \frac{1}{1.26}$$



水分拡散係数を記述する関数は、含水率が0または自然飽和状態に至ると、無限大となる。どちらの範囲においても、勾配が著しく大きくなり、膨大な量の表への記述が必要となる。また、WUFIでは $D_w = \text{無限大}$ と設定することはできない。しかし、ベンチマークテストでは、含水率の範囲が 42.9 kg/m^3

(50 % RHに相当) から 129.0 kg/m^3 (95% RHに相当) に限定されるため、 40 と 130 kg/m^3 の間のみの水分拡散係数を表で記述する。この範囲における、表で記述した水分拡散係数と、規格で与えられている関数で表される水分拡散係数の相対誤差 (それぞれ、対数をとる) は、 0.1% 以下である。

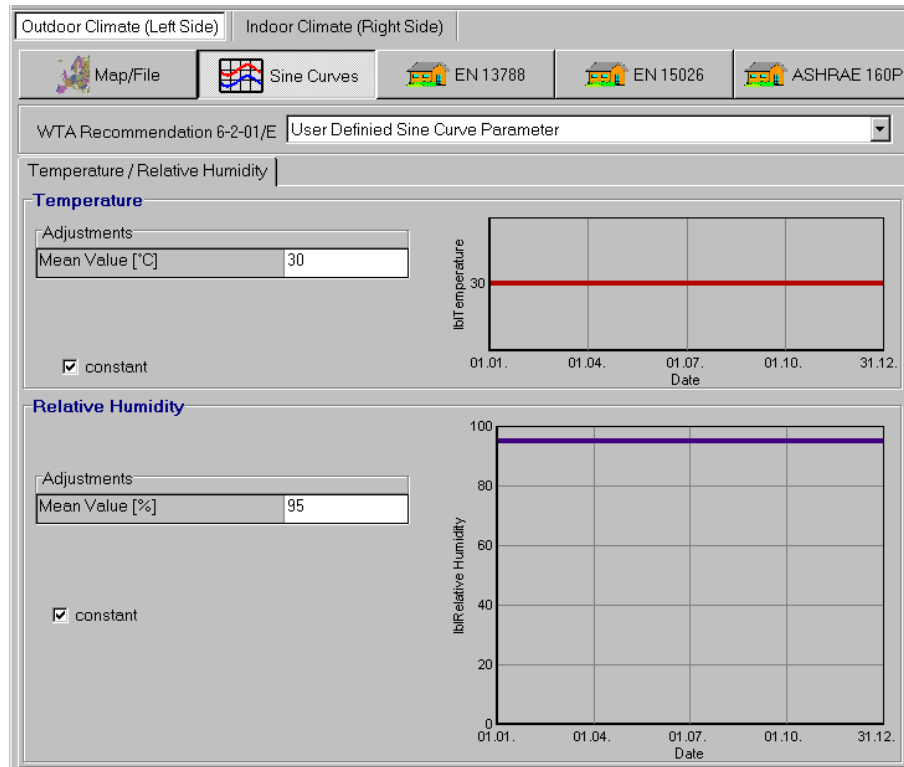


初期条件

計算初期の材料は、 $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ および $\varphi = 50\%$ の周辺空気と平衡状態にあるという設定である。よって、この条件を、材料全体の初期状態として与える。

境界条件

計算開始時の境界条件を $\vartheta = 30^\circ\text{C}$ 、 $\varphi = 95\%$ とし、この条件が計算終了まで続くよう荷設定した。WUFIでは、サインカーブによる境界条件を用いて、振幅を 0 (「一定」にチェックを入れる) とし、「平均値」に値を入力することで、一定の状態を記述することができる。



表面伝達係数

ベンチマークテストの規格には、空気に接する表面の伝達抵抗が与えられていない。このため、WUFIの計算において、空気に接する左側の表面に与える熱伝達対抵抗および表面に透湿抵抗を与えるための s_d -値を、0とした。

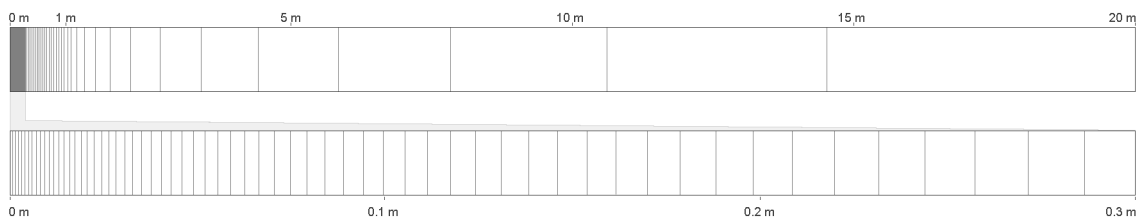
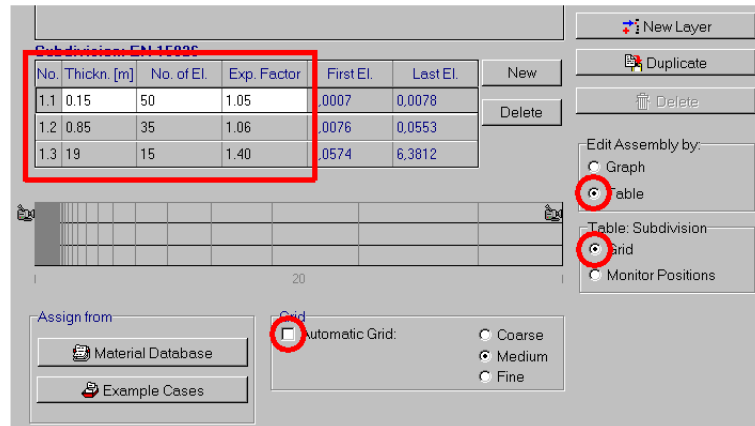
右側の「半永久的に続く」側の表面は、材料内部の温度と湿気の分布が、材料の右側に与える境界条件の影響を受けないように、十分に大きい伝達抵抗を与えた。（これにより、右側の境界条件は任意に設定することができる。）また、左側から入った熱および湿気が、右側に到達したかどうかを確認することもできる。

Case:	
Assembly/Monitor Positions	Orientation/Inclination/Height
Surface Transfer Coeff. Initial Conditions	
Exterior Surface (Left Side)	
Heat Resistance [m ² K/W]	0 User Defined
<input type="checkbox"/> wind-dependent	<input checked="" type="checkbox"/> includes long-wave radiation parts
Sd-Value [m]	— No coating
Short-Wave Radiation Absorptivity [-]	— No absorption/emission
Long-Wave Radiation Emissivity [-]	— Details >>
Rain Water Absorption Factor [-]	— No absorption
Interior Surface (Right Side)	
Heat Resistance [m ² K/W]	9e9 (User Defined)
Sd-Value [m]	9e9 User Defined

数値グリッド

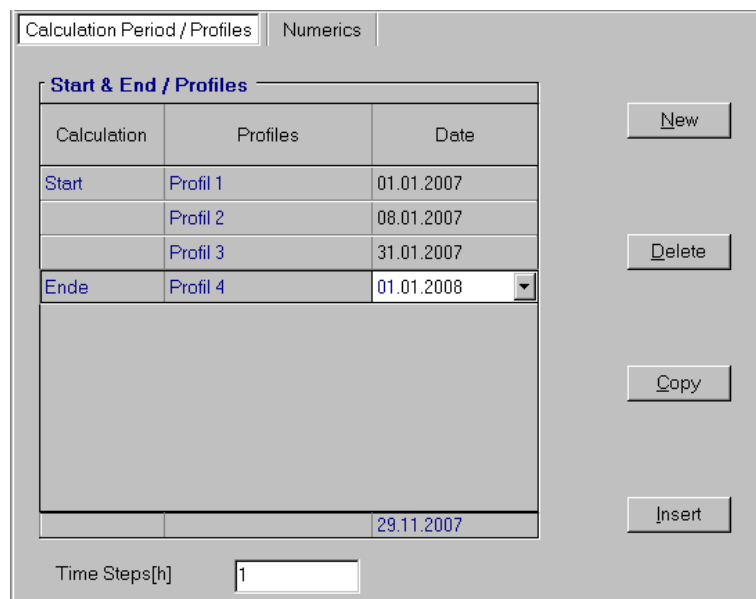
モデル化を行う材料は、計算期間中に温度と相対湿度の変化がモデルの右端（半永久的に伸びているとの仮定）に到達しないよう、または計算結果に影響がない程度に、十分な厚みを与える必要がある。適当な厚みは、いくつかの簡単なテスト計算によって算出することができる。20 m の厚みを与えると、右端における温度変化は 計算期間中の温度上昇が0.3 °Cと、ごくわずかであった。湿気については、20 cm の厚みにのみ変化が見られた。

数値グリッドは温度および湿度の両方の分布が十分に正確に算出できる程度に分割される必要があるが、温度変化が厚み全体に生じるのに対して、湿気の変化はごくわずかな距離で生じる。今回の計算では、WUFI が行う自動分割では十分ではないが、WUFI では、計算する内容に応じて、グリッドの分割を手動で設定することができる。今回の計算では、総じて100のグリッド要素に分割し、そのうちの50の要素は、材料の左端から 15 cm の範囲に蜜に設定した。（湿気の急激な変化を算出するためには細かくグリッド分割する必要があるため）右端から 19 cm の範囲は大きく15要素に分割し（ゆるやかな温度変化を計算するため）、それらの間は、35要素に分割した。サブグリッドの拡張ファクター（1.05、1.06、1.40）は、隣り合うグリッド要素の大きさが異なりすぎることのないように設定した。つまり、右側に生じる温度変化は緩やかであるため、右側に向かうグリッド分割は、徐々に大きくすることが許される。



計算

計算は、少なくとも365日間行う必要があるため、2007年1月1日から2008年1月1日までの計算を行った。（年号は計算に影響がない。）計算開始から7日後と30日後の分布の結果を得るため、2007年1月8日および同年1月31日における計算結果を保存する設定を行った。



ベンチマークテストのための計算は、数秒で終了した。WUFI のASCIIファイルへのエクスポート機能を用いて、任意の日時における分布をテキストファイルとして出力し、参照用の結果と比較を行う。

