

WUFI erfüllt Benchmark-Test nach DIN EN 15026

WUFI erfüllt die allgemeinen Anforderungen sowie den Benchmark-Test nach DIN EN 15026:

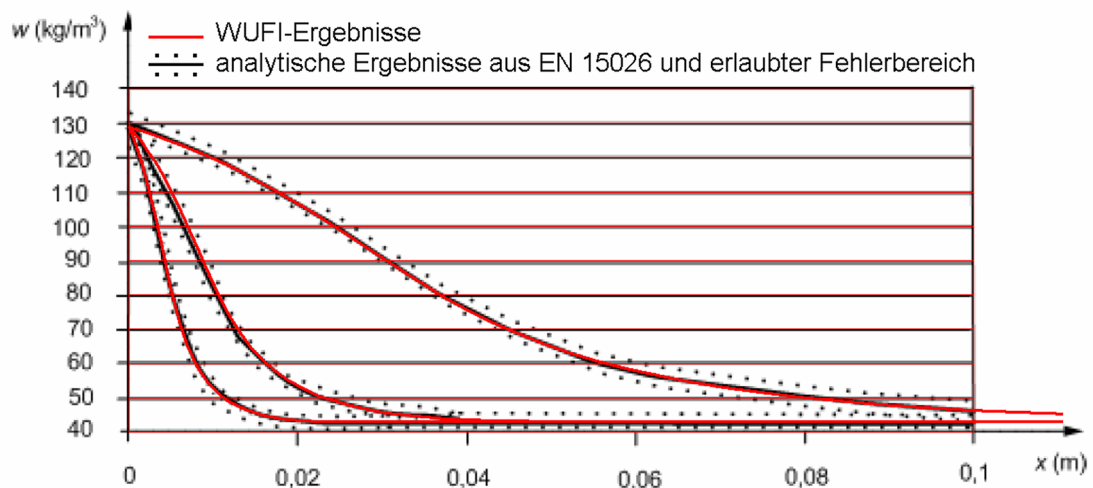


Figure A.1 — The moisture distribution at 7 days, 30 days and 365 days
(Hintergrundbild: EN 15026)

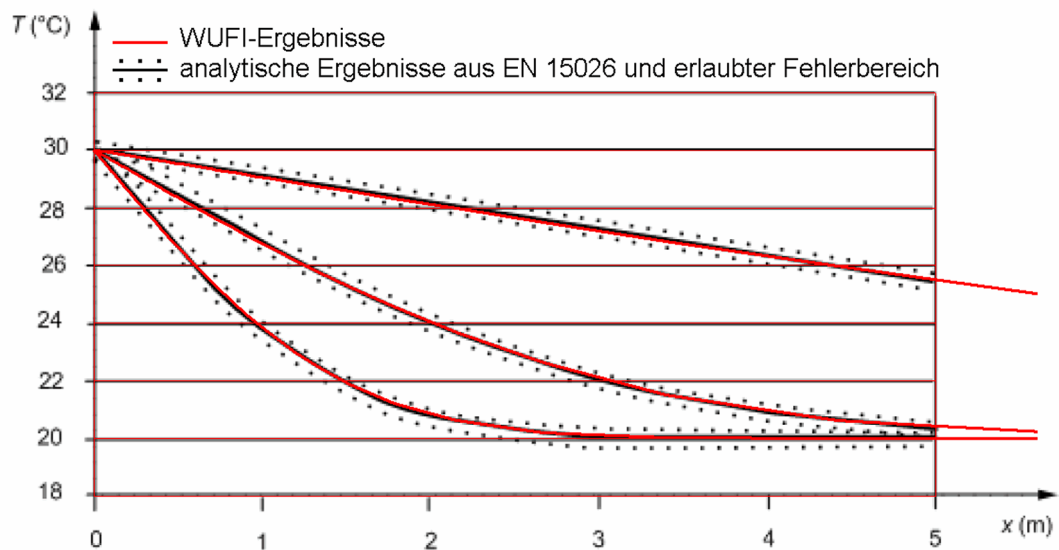


Figure A.2 — The temperature distribution at 7 days, 30 days and 365 days
(Hintergrundbild: EN 15026)

Der Benchmark-Test berechnet das gekoppelte thermische und hygri-sche Verhalten eines halbusendlich ausgedehnten homogenen Probenstücks, das sich ursprünglich im Gleichgewicht mit seinen Umgebungsbedingungen ($\vartheta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 50\%$) befindet und dann einem Klimasprung auf $\vartheta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 95\%$ ausgesetzt wird. Die plötzliche Erhöhung von Temperatur und Ausgleichswassergehalt an der Oberfläche verursacht Wärme- und Feuchteströme in das Probeninnere. Die sich jeweils nach 7, 30 und 365 Tagen einstellenden Temperatur- und Wassergehaltsprofile sind zu berechnen und mit den Referenzlösungen der Norm zu vergleichen. Die Ergebnisse dürfen nicht mehr als 2,5 % von der Referenzlösung abweichen.

Materialkenndaten

Die Norm gibt die für das Benchmark-Material zu verwendenden hygrothermischen Materialkenndaten vor. Die feuchteabhängigen Kenndaten sind als analytische Funktionen gegeben, welche für WUFI geeignet tabelliert werden müssen. Der Diffusionsleitkoeffizient und der Durchlässigkeitskoeffizient für Flüssigtransport müssen ausserdem auf die von WUFI verwendeten Formelgrößen umgerechnet werden.

Grundkenndaten

Die volumenbezogene Wärmekapazität des trockenen Materials wird als

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

vorgegeben. WUFI benötigt die Rohdichte ρ_0 und die massenbezogene Wärmekapazität c_0 separat. Die Aufteilung in Einzelfaktoren ρ_0 und c_0 ist beliebig, solange das Produkt $\rho_0 \cdot c_0$ dasselbe bleibt. Mit der willkürlichen Wahl

$$c_0 = 850 \text{ J/(kg K)} \text{ (Richtwert für mineralische Materialien)}$$

folgt

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

Die Porosität des Materials soll laut Vorgabe so gewählt werden, dass der maximale Wassergehalt gleich dem Maximalwert der Feuchtespeicherfunktion ($u_f = 146 \text{ kg/m}^3$, s.u.) wird. Daraus folgt

$$\text{Porosität} = 146 \text{ kg/m}^3 / 1000 \text{ kg/m}^3 = 0.146.$$

Die Wärmeleitfähigkeit ist als feuchteabhängige Funktion

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

vorgegeben. Diese Funktion ist linear vom Wassergehalt w abhängig; es genügt daher, in WUFIs Wärmeleitfähigkeitstabelle die beiden Extremwerte der Wärmeleitfähigkeit

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

einzugeben; Zwischenwerte werden von WUFI automatisch linear interpoliert.

Feuchtespeicherfunktion

Die Feuchtespeicherfunktion eines Materials gibt den Ausgleichswassergehalt an, der sich bei gegebener Saugspannung p_{suc} des kapillaren Porenwassers bzw. gegebener relativer Feuchte φ der Porenluft einstellt. Saugspannung und relative Feuchte lassen sich über die Kelvin-Gleichung ineinander umrechnen:

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

p_{suc} : kapillare Saugspannung, Pa

ρ_w : Dichte von Wasser, 1000 kg/m^3

$R_{\text{H}_2\text{O}}$ = R/M_w : Gaskonstante für Wasserdampf, $\text{J}/(\text{kg K})$

R : universelle Gaskonstante, $8.314 \text{ J}/(\text{mol K})$

M_w : Molmasse von Wasser, 0.018 kg/mol

T : Temperatur, K

φ : relative Feuchte, -

Die Feuchtespeicherfunktion des Benchmark-Materials wird von der Norm als analytische Funktion vorgegeben, und zwar optional als Funktion der kapillaren Saugspannung oder als Funktion der relativen Feuchte:

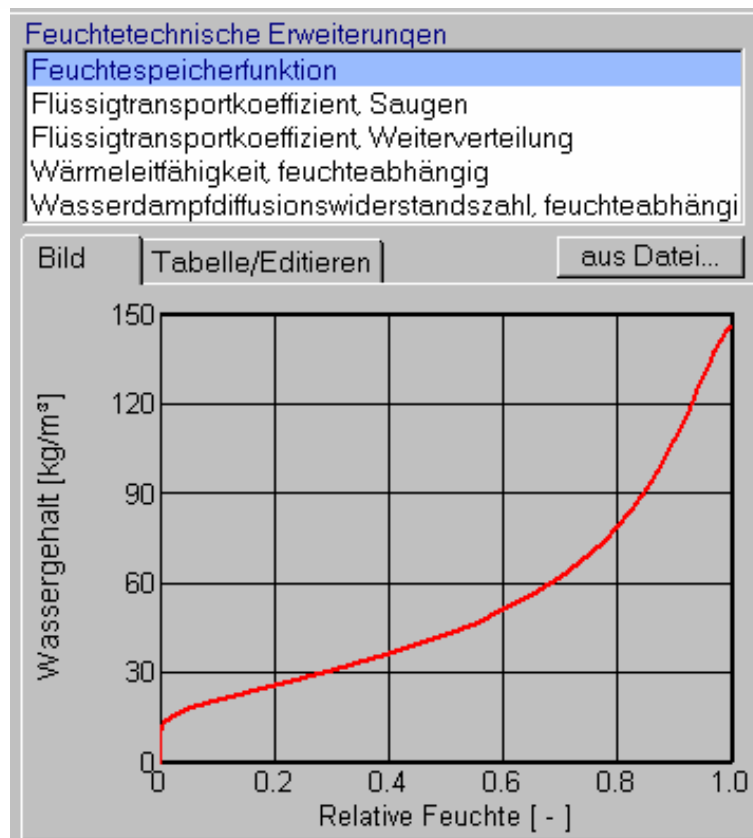
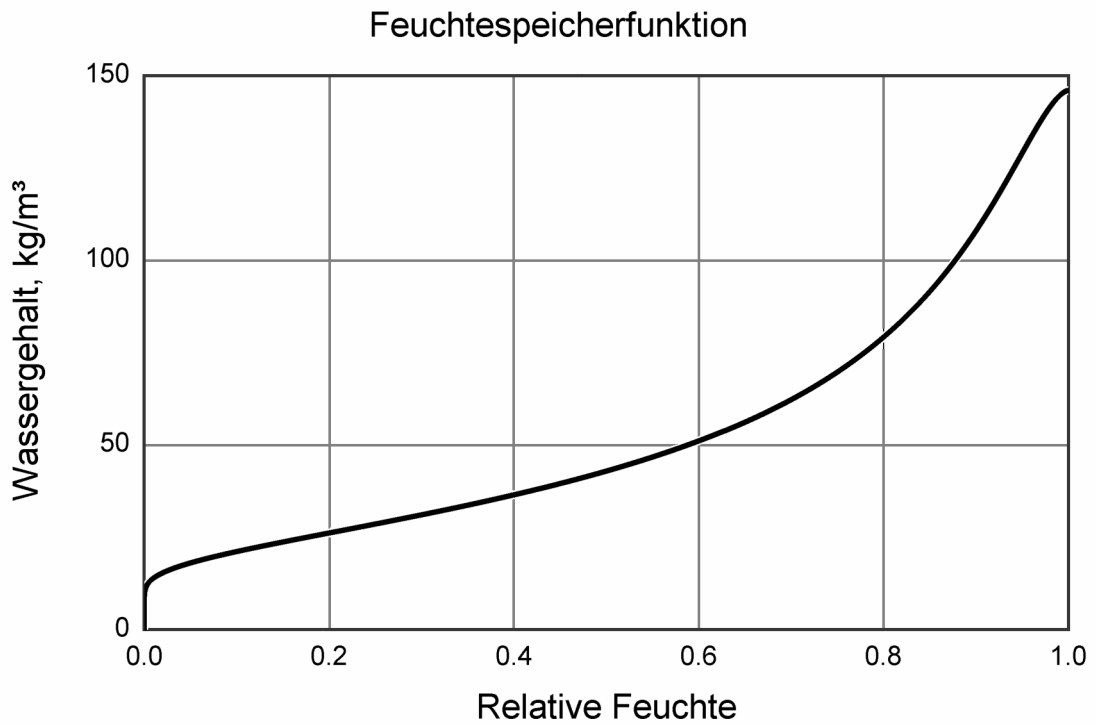
$$w = \frac{146}{\left(1 + (8 \cdot 10^{-8} \cdot p_{\text{suc}})^{1.6}\right)^{0.375}}$$

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

- w : Wassergehalt, kg/m³
- p_{suc} : kapillare Saugspannung, Pa
- φ : relative Feuchte, -
- T : Referenztemperatur, 293.15 K

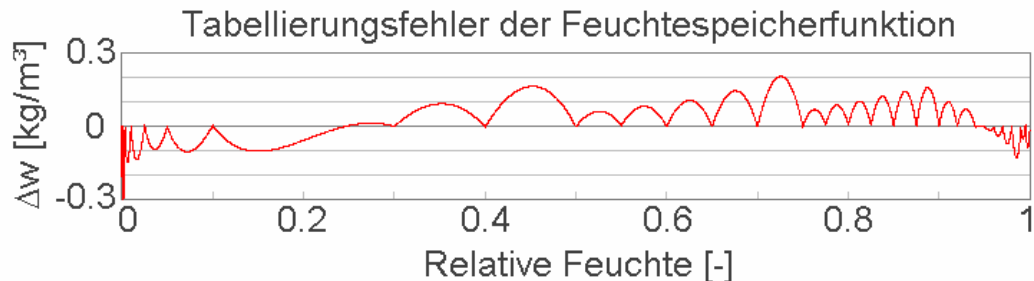
WUFI erwartet den Ausgleichswassergehalt als Funktion der relativen Feuchte, benutzt also die zweite Alternative. Da WUFI die Feuchtespeicherfunktion als temperaturunabhängig behandelt (eine auch in der Norm vorausgesetzte Modellvereinfachung), ist für die in der betreffenden Formel auftretende Temperatur T nicht die während der Rechnung im jeweiligen Gitterelement herrschende Temperatur anzusetzen, sondern ein fester Wert, in diesem Fall die von der Norm als Referenztemperatur vorgegebenen 293.15 K.

Die von der Norm genannte Funktion muss in WUFI als Tabelle von Funktionswerten eingegeben werden. WUFI interpoliert zwischen den einzelnen Tabellenwerten linear; bei solchen Tabellierungen sind daher die Stützpunkte so zu wählen, dass die Unterschiede zwischen der interpolierten Funktion und der Originalfunktion hinreichend klein bleiben. Insbesondere stark gekrümmte Funktionsbereiche müssen durch ausreichend viele Stützpunkte abgedeckt werden. In steilen Funktionsbereichen ist ein optischer Kurvenvergleich oft irreführend, da eng beieinanderliegende Kurven den Eindruck guter Übereinstimmung erwecken können, während der ausschlaggebende Abstand der Kurven in y-Richtung inakzeptabel groß sein kann. Die Feuchtespeicherfunktion ist in beiderlei Hinsicht relativ unproblematisch.



Für die im vorliegenden Fall gewählte Tabellierung bleibt der Tabellierungsfehler unter 0.3 kg/m³; für die im Benchmark-Fall auftretenden Feuchten, die

sich auf den Bereich zwischen 50 % und 95 % beschränken, bleibt er sogar unter 0.2 kg/m³.



μ-Wert

Der Dampfdiffusionsstrom g_v im Material ist proportional zum lokalen Gradienten $\partial p/\partial x$ des Partialdampfdrucks p :

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

Der materialabhängige Proportionalitätskoeffizient δ_p muss sämtliche den Diffusionsstrom beeinflussende Faktoren beinhalten: Temperatur und Druck der Porenluft, Porenanteil am Gesamtvolumen, Porenradienverteilung, Porenverzweigungsstruktur, Wassergehalt usw. Dieses komplexe Verhalten lässt sich leichter behandeln, wenn δ_p in zwei Anteile zerlegt wird, welche separat den materialunabhängigen Einfluss der Porenluft und den materialabhängigen Einfluss der Porenraumstruktur beschreiben:

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

δ_p : Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient im Material, kg/(m s Pa)

δ : Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft, kg/(m s Pa)

μ : Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl des Materials, -

WUFI benutzt diese Zerlegung. Es benötigt nur die Eingabe der (möglicherweise wassergehaltsabhängigen) materialspezifischen Diffusionswiderstands-

zahl μ . Den Diffusionsleitkoeffizienten in Luft δ berechnet es unter Berücksichtigung von Temperatur und Druck der Porenluft automatisch nach der Formel

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

ϑ : Lufttemperatur, °C

P : Luftdruck, Pa

Aus δ und dem vom Benutzer eingegebenen μ berechnet das Programm dann δ_p , um den Diffusionsstrom zu ermitteln.

Anstelle des von WUFI benutzten μ -Wertes gibt die Norm für das Benchmarkmaterial den kompletten materialspezifischen Diffusionsleitkoeffizienten δ_p vor:

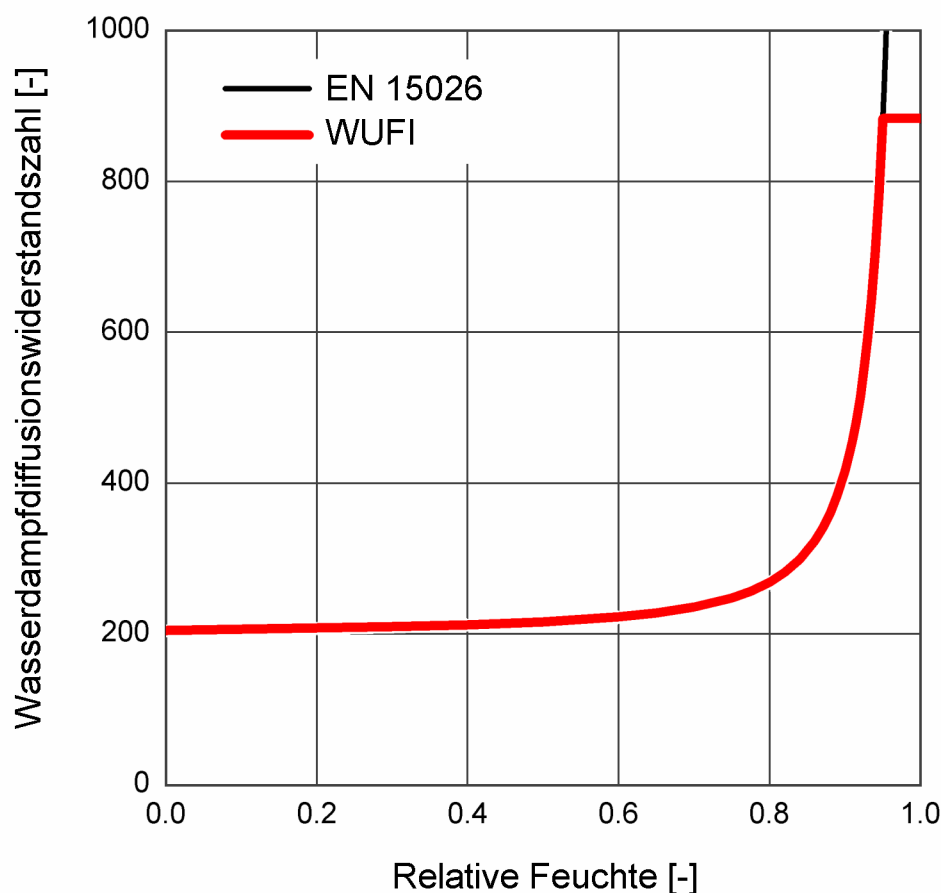
$$\delta_p = \frac{M_w}{RT} \cdot \frac{26.1 \cdot 10^{-6}}{200} \cdot \frac{1 - \frac{w}{146}}{0.503 \left(1 - \frac{w}{146}\right)^2 + 0.497}$$

Eine Berücksichtigung von Temperatur und Druck der Porenluft, wie sie von WUFI automatisch vorgenommen wird, ist in dieser Formel nicht vorgesehen (die Temperatur T in der obigen Formel dient lediglich der Umrechnung der Wasserdampfkonzentration in den Partialdruck).

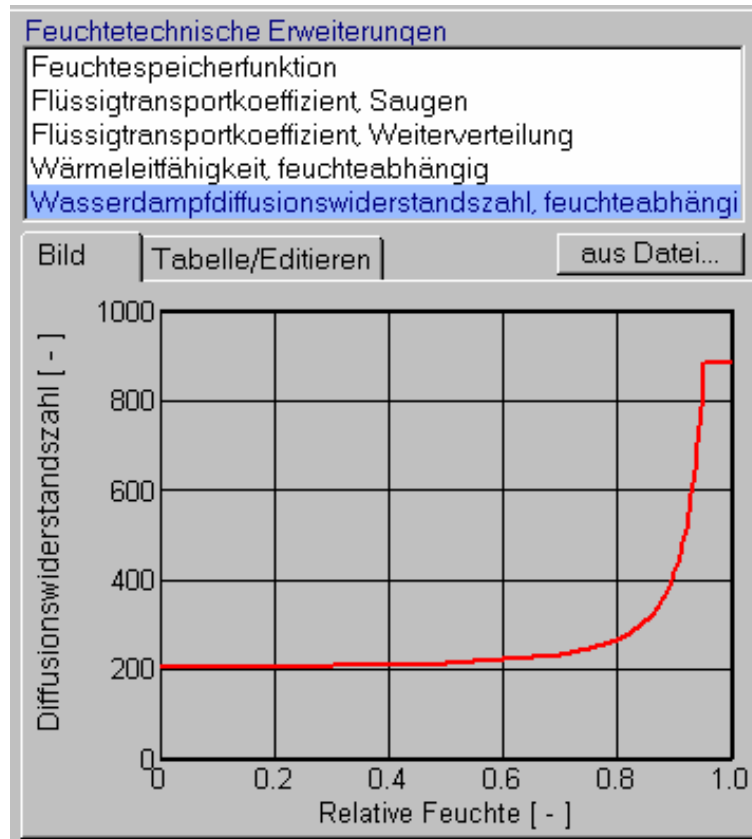
Zur Verwendung mit WUFI muss das vorgegebene δ_p so in den einzugebenden μ -Wert umgerechnet werden, dass das aus der internen Auswertung von WUFI resultierende δ_p möglichst nahe mit dem vorgegebenen übereinstimmt. Völlige Übereinstimmung ist nicht zu erreichen, da einerseits bei der Umrechnung $\delta_p \rightarrow \mu$ ein konstantes δ verwendet werden muss (Temperatur und Druck in der Porenluft sind nicht im Voraus bekannt) und sich andererseits die Berücksichtigung von Temperatur und Druck bei der internen Auswertung $\mu \rightarrow \delta_p$ in WUFI nicht abschalten lässt.

Als Kompromiss bietet sich an, bei der Umrechnung von δ_p nach μ geschätzte Werte für Temperatur und Druck zu verwenden, von denen zu erwarten ist, dass sie für den durchschnittlichen Zustand des Bauteils repräsentativ sind, z.B. $\vartheta = 25 \text{ °C}$ und $P = 101325 \text{ Pa}$:

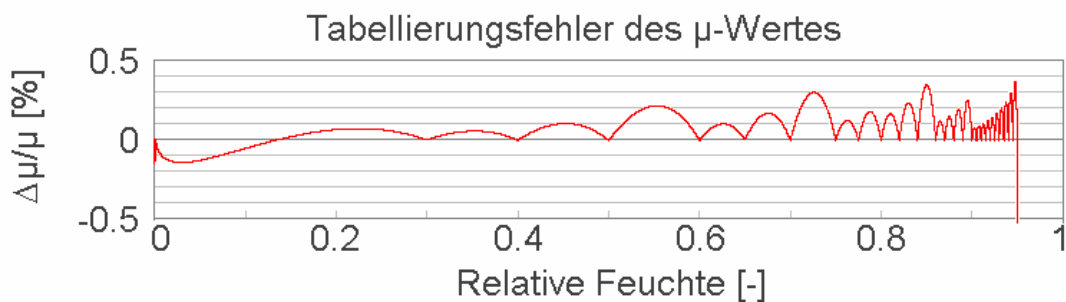
$$\mu = \frac{\delta}{\delta_p} = \frac{1.968 \cdot 10^{-7} \cdot (\vartheta + 273)^{0.81}}{P \cdot \delta_p} = \frac{1.968 \cdot 10^{-7} \cdot (25 + 273)^{0.81}}{101325 \cdot \delta_p}$$



Die vorgegebene Funktion $\delta_p(w)$ geht gegen Null, wenn das Material die freie Sättigung erreicht, der zugehörige μ -Wert geht daher gegen unendlich. Die zunehmende Steilheit der Kurve würde eine unpraktikabel enge Tabellierung erfordern, der Wert $\mu = \text{unendlich}$ bei freier Sättigung wäre in WUFI gar nicht darstellbar. Da im Benchmark-Fall jedoch keine Feuchte über $\varphi = 95 \%$ auftritt, kann für den vorliegenden Zweck die Tabellierung bei 95 % abgebrochen werden.



Für die hier gewählte Tabellierung bleibt der relative Tabellierungsfehler im Bereich von 0 bis 95 % r.F. unter 0.4 %.



Flüssigtransportkoeffizient

WUFI ermittelt den Feuchtestrom g_w , der sich infolge Kapillarleitung bei Vorliegen eines Wassergehaltsgradienten $\partial w/\partial x$ einstellt, über die Gleichung

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

Die DIN EN 15026 benutzt hingegen die Gleichung

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

(läßt aber äquivalente Gleichungen wie die von WUFI benutzte ebenfalls zu).

Der feuchteabhängige Durchlässigkeitskoeffizient K für das Benchmark-Material ist als analytische Funktion gegeben:

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

Diese Funktion muss über den Zusammenhang

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

in den von WUFI benutzten Flüssigtransportkoeffizienten D_w umgerechnet werden. Die dazu benötigte Funktion $p_{suc}(w)$ ist die Umkehrfunktion der Feuchtespeicherfunktion $w(p_{suc})$, wenn diese als Funktion der Saugspannung p_{suc} anstelle der relativen Feuchte ϕ ausgedrückt wird (siehe oben). Die DIN EN 15026 gibt diese Umkehrfunktion explizit an:

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

Ihre Ableitung nach w lautet:

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

Die DIN EN 15026 erlaubt es, die Temperaturabhängigkeit des Flüssigtransports zu vernachlässigen. Sie verwendet daher in ihrer Referenzlösung auch

selbst den Durchlässigkeitskoeffizienten unverändert in der oben gegebenen temperaturunabhängigen Form.

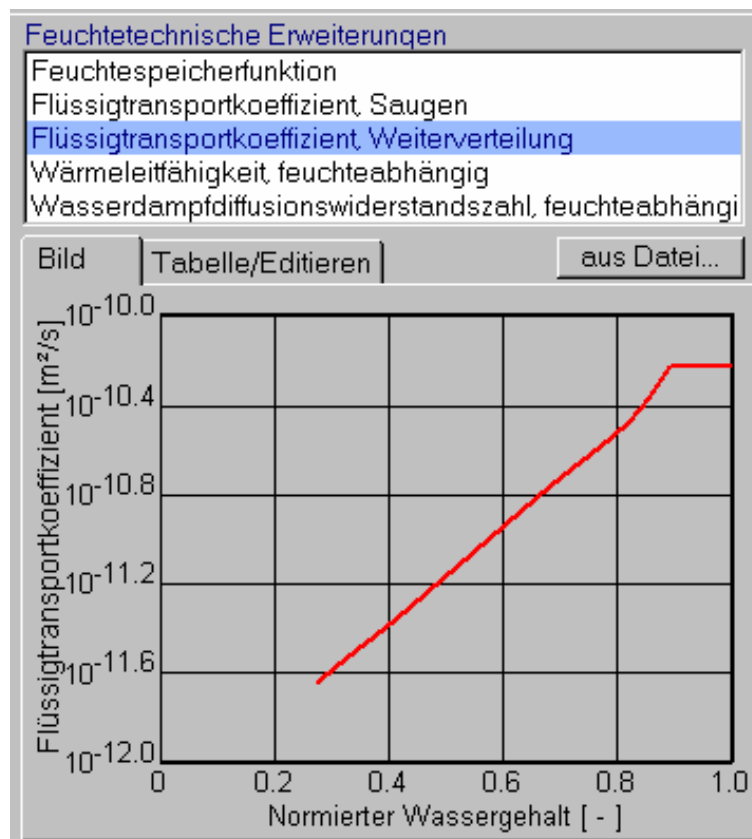
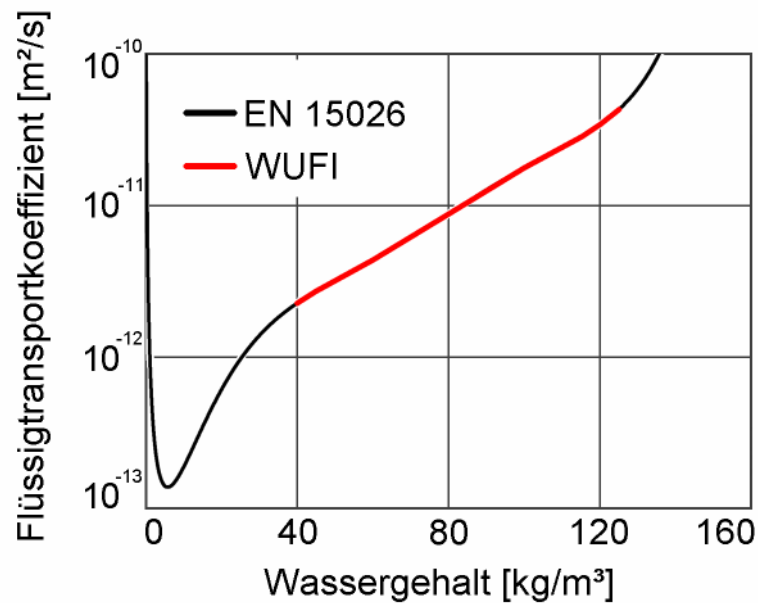
WUFI hingegen berücksichtigt die Temperaturabhängigkeit des Flüssigtransportkoeffizienten, welche hauptsächlich durch die Abnahme der Viskosität des Kapillarwassers mit steigender Temperatur verursacht wird. Dazu betrachtet WUFI die vom Benutzer eingegebenen Werte des Flüssigtransportkoeffizienten als die für 20 °C gültigen Referenzwerte und korrigiert sie je nach der im betreffenden Gitterelement herrschenden Temperatur durch Multiplikation mit dem Viskositäts-Korrekturfaktor

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

Da im vorliegenden Fall der Flüssigtransport praktisch ausschließlich in einem Bereich stattfindet, in dem die Temperatur bereits auf 30 °C angestiegen ist, rechnet WUFI überall, wo merklicher Flüssigtransport auftritt, durchweg mit einem auf 30 °C umgerechneten Flüssigtransportkoeffizienten. Dazu multipliziert es ihn mit dem Korrekturfaktor $\text{visfac}(30 \text{ °C}) = 1.26$. Die aufgenommene Wassermenge steigt dadurch gegenüber der vereinfachten Referenzlösung um den Faktor $\sqrt{1.26}$ an und überschreitet die von der Norm akzeptierten Grenzen. Da sich die Temperaturkorrektur für den Flüssigtransportkoeffizienten in WUFI nicht abschalten lässt, müssen die in WUFI eingegebenen Werte durch 1.26 dividiert werden, um nach der automatischen Temperaturkorrektur exakt die von der Norm vorgegebenen Werte anzunehmen.

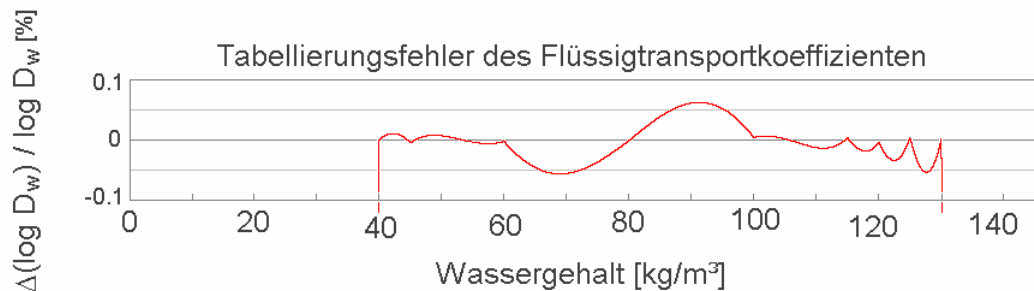
Insgesamt ergibt sich für den Flüssigtransportkoeffizienten

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



Der als analytische Funktion gegebene Flüssigtransportkoeffizient geht gegen unendlich, wenn der Wassergehalt dem Wert Null oder der freien Sättigung zustrebt. Die zunehmende Steilheit der Kurve an beiden Enden würde eine unpraktikabel enge Tabellierung erfordern, die Endwerte $D_w = \text{unendlich}$

wären in WUFI gar nicht darstellbar. Da im Benchmark-Fall jedoch nur Feuchtegehalte im Bereich zwischen 42.9 kg/m^3 (entspricht 50 % r.F.) und 129.0 kg/m^3 (entspricht 95% r.F.) auftreten, kann sich die Tabellierung auf den Bereich von 40 bis 130 kg/m^3 beschränken. Für die hier gewählte Tabellierung bleibt der relative Tabellierungsfehler des logarithmierten Flüssigtransportkoeffizienten in diesem Bereich unter 0.1 %.

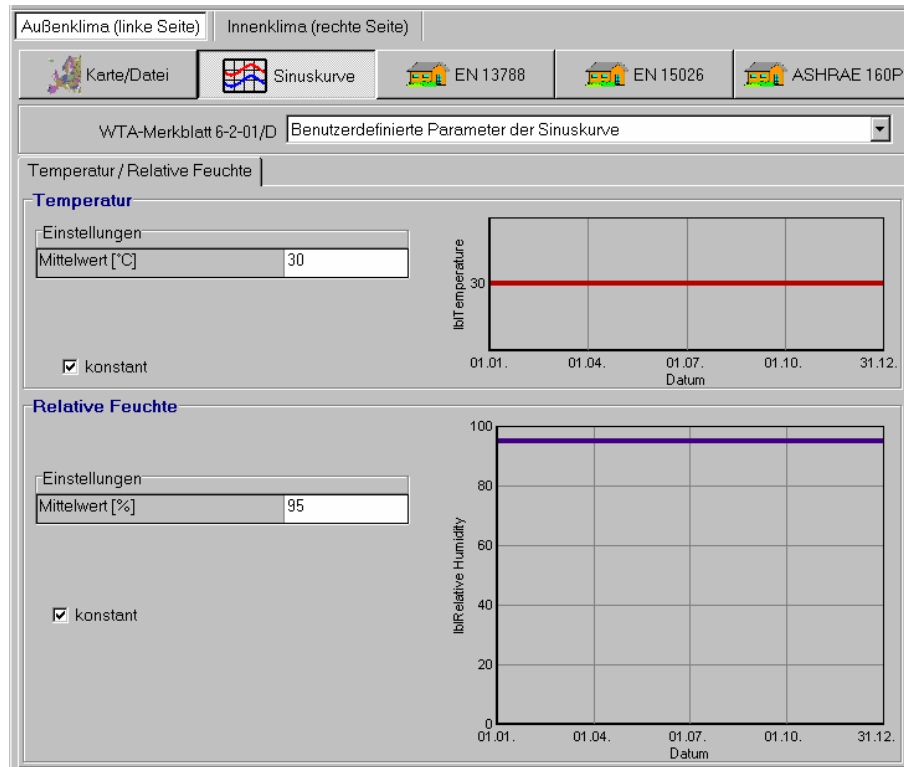


Anfangsbedingungen

Das Probenstück befindet sich anfangs im Gleichgewicht mit den Umgebungsbedingungen $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ und $\varphi = 50\%$. Dieser hygrothermische Zustand wird daher auch als Anfangszustand im gesamten Probenstück angenommen.

Randbedingungen

Mit Berechnungsbeginn springen die Randbedingungen auf $\vartheta = 30^\circ\text{C}$, $\varphi = 95\%$ und bleiben dann konstant. In WUFI werden diese neuen konstanten Randbedingungen am einfachsten als Sinuskurven mit Amplitude Null (Option „konstant“) und den betreffenden Bedingungen als Mittelwert beschrieben.



Oberflächenübergangskoeffizienten

Für die freie Oberfläche sind laut Vorgabe keine Übergangswiderstände anzusetzen (andernfalls wäre keine analytische Referenzlösung möglich). Wärmeübergangswiderstand und sd-Wert für die linke Oberfläche sind in WUFI daher auf Null zu setzen.

Für die rechte, „unendlich weit entfernte“ Oberfläche empfiehlt es sich, hohe Übergangswiderstände zu verwenden, so dass die auf der rechten Seite anzulegenden Randbedingungen keinen Einfluss haben (und beliebig gewählt werden können). Auf diese Weise kann auch überprüft werden, ob im Verlauf der Rechnung die von links her eindringenden Temperatur- oder Feuchteänderungen die rechte Seite erreichen.

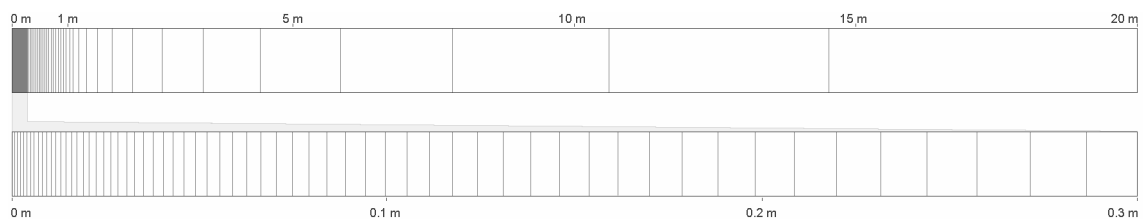
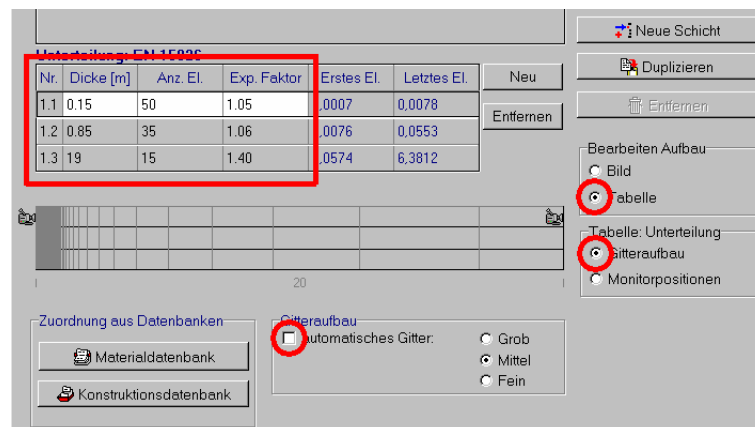
Variante:	
Aufbau/Monitorpositionen	Orientierung/Neigung/Höhe
Oberflächenübergangskoeff.	
Anfangsbedingungen	
Außenoberfläche (linke Seite)	
Wärmeübergangswiderstand [m ² K/W]	0 Benutzerdefiniert
<input type="checkbox"/> Windabhängig	<input checked="" type="checkbox"/> beinhaltet langwellige Strahlungsanteile
Sd-Wert [m]	Keine Beschichtung
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl [-]	Keine Absorption/Emission
Langwellige Strahlungsemissionszahl [-]	Erweitert >>
Regenwasserabsorptionszahl [-]	Keine Regenwasserabsorption
Innenoberfläche (rechte Seite)	
Wärmeübergangswiderstand [m ² K/W]	9e9 (Benutzerdefiniert)
Sd-Wert [m]	9e9 Benutzerdefiniert

Numerisches Gitter

Die Dicke des Bauteils im Rechenmodell ist so zu wählen, dass die Temperatur- und Feuchteänderungen die rechte (als unendlich weit entfernt angenommene) Oberfläche nicht erreichen oder sich dort zumindest nur unwesentlich stauen. Mit Hilfe einiger vorläufiger Testrechnungen lässt sich leicht eine ausreichende Dicke ermitteln. Bei der hier gewählten Bauteildicke von 20 m ergibt sich bis Berechnungsende an der rechten Oberfläche lediglich ein unerheblicher Temperaturanstieg von 0.3 °C. Die Feuchteänderungen bleiben ohnehin auf die ersten 20 cm beschränkt.

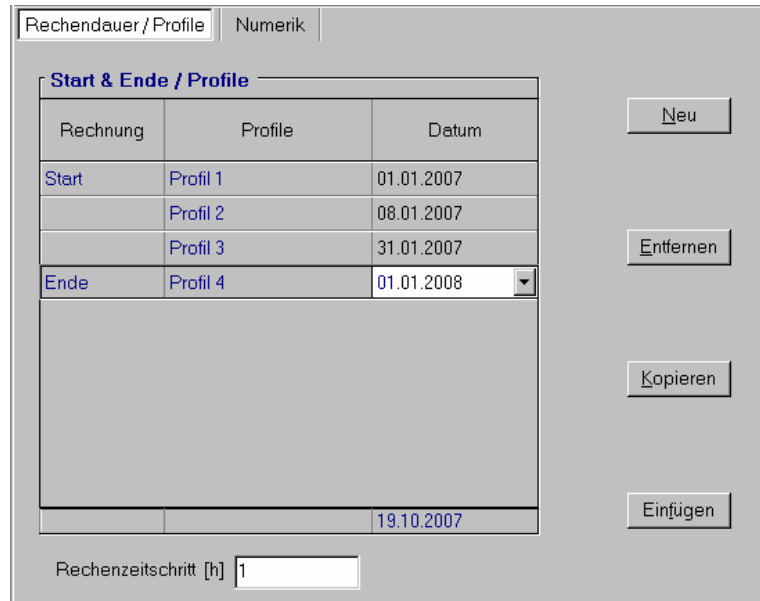
Das numerische Gitter muss in der Lage sein, sowohl das Feuchte- als auch das Temperaturprofil hinreichend gut aufzulösen, obwohl sie sich in sehr unterschiedliche Bauteiltiefen erstrecken. Mit den von WUFI automatisch generierten Allzweckgittern ist dies für die vorliegenden extremen Verhältnisse nicht möglich, es kann jedoch ein manuell an die Problemstellung angepasstes Gitter erstellt werden. In dem hier gewählten Gitter werden von den 100 zur Verfügung stehenden Gitterelementen 50 schmale Elemente auf die ersten 15 cm verteilt (wo ein feines Gitter für das rasch abfallende Feuchteprofil benötigt wird), 15 breite Elemente auf die letzten 19 Meter (zur Berechnung des flach auslaufenden Temperaturprofils) und die restlichen 35 Elemente auf die 85 cm breite Übergangszone dazwischen. Die Expansionsfaktoren der Teilgitter (1.05, 1.06 und 1.40) werden so angepasst, dass an den Übergängen zwischen den Teilgittern die Dicken der beiden Randle-

mente möglichst ähnlich sind; zur rechten Seite hin dürfen die Gitterelemente sehr breit werden, da das Temperaturprofil flach ausläuft.



Rechnung

Der Berechnungszeitraum muss sich über mindestens 365 Tage erstrecken, daher wird als Startzeitpunkt der 01.01.2007 und als Endzeitpunkt der 01.01.2008 gewählt (die Jahreszahlen sind dabei beliebig). Um die geforderten Profile für den 7. und 30. Tag zu erhalten, werden zusätzlich der 08.01.2007 und der 31.01.2007 in die Rechenzeitliste aufgenommen.



Die Berechnung des Benchmark-Falls dauert nur wenige Sekunden. Über die ASCII-Ausgabe können die Profile für die einzelnen Zeitpunkte in eine Textdatei ausgelesen und anschließend mit der Referenzlösung verglichen werden.

