

2.4 Výpočtové postupy a závislosti

Jak již bylo uvedeno výše, jsou lineární činitel prostupu tepla ψ a bodový činitel prostupu tepla χ nikoliv fyzikálními veličinami, ale činiteli, jimiž se do výpočtu zavádí korekce pro dvou či trojrozměrné teplotní pole.

Naproti tomu součinitel prostupu tepla U [$W/(m^2 \cdot K)$] je fyzikální veličinou, která udává tepelný tok ve wattech danou konstrukcí při ustáleném teplotním stavu na jednotkovou plochu a při jednotkovém teplotním spádu. Jde o převrácenou hodnotu tepelného odporu R [$(m^2 \cdot K)/W$].

Teplotní faktor f_{Rsi} [-] je bezrozměrné číslo, které udává poměrnou teplotu vnitřního povrchu. Výhodou tohoto teplotního faktoru je, že se při různých teplotních spádech může velmi jednoduše a rychle přepočítat povrchová teplota pro dané vnější a vnitřní tepoty.

Vztahy pro výpočet jsou jednoduché: Je-li znám teplotní faktor a vnější a vnitřní teplota θ_e a θ_{ai} , pak pro vnitřní povrchovou teplotu platí vztah:

$$\theta_{si} = \theta_{ai} - (1 - f_{Rsi}) \cdot (\theta_{ai} - \theta_e)$$

Pokud je spočítána vnitřní povrchová teplota θ_{si} , lze teplotní faktor spočítat takto:

$$f_{Rsi} = 1 - (\theta_{ai} - \theta_{si}) / (\theta_{ai} - \theta_e)$$

Pro tyto přepočty bude na webu www.tepelnymost.cz zprovozněna jednoduchá kalkulačka, která uživateli umožní okamžitý přepočet těchto hodnot.

Praktický příklad 1:

Spočítejte vnitřní povrchovou teplotu, když znáte:

Teplota interiéru $\theta_{ai} = 20$ °C

Teplotní oblast $\theta_e = -5$ °C

Teplotní faktor $f_{Rsi} = 0,750$

$$\theta_{si} = \theta_{ai} - (1 - f_{Rsi}) \cdot (\theta_{ai} - \theta_e) = 20 - (1 - 0,750) \cdot (20 - (-15)) = 11,25$$
 [°C].

Toto také lze zjistit v příloze 3 a 4 – Tabulka přepočtu teplotního faktoru na povrchovou teplotu.

Praktický příklad 2:

Spočítejte teplotní faktor, když znáte:

Teplota interiéru $\theta_{ai} = 20 \text{ °C}$

Teplotní oblast $\theta_e = -15 \text{ °C}$

Vnitřní povrchová teplota $\theta_{si} = 12,3 \text{ °C}$

$$f_{Rsi} = 1 - (\theta_{ai} - \theta_{si}) / (\theta_{ai} - \theta_e) = 1 - (20 - 12,3) / (20 - (-15)) = 0,780 [-]$$

Toto také lze zjistit v příloze 3 a 4 – Tabulka přepočtu teplotního faktoru na povrchovou teplotu.

2.5 Vliv použitého výpočtového programu na

vypočtené výsledky

Výpočty teplotních polí lze v současnosti řešit širokou škálou dostupných programů, které se mezi sebou liší v různých parametrech a možnostech. Mohou se lišit např. v typu řešené úlohy, a to z hlediska geometrie řešené úlohy (jedno, dvou či trojrozměrná pole), uvažovaného souřadného systému (kartézský, cylindrický, sférický), nebo z hlediska závislosti na čase (stacionární, řešící pouze ustálená teplotní pole, či nestacionární, jež řeší teplotní pole v zadaném časovém intervalu). Každý program řešící jakékoliv fyzikální pole jej řeší diskrétně (nespojité), což znamená, že své stavové veličiny (u teplotních polí je to teplota v bodě) počítá pouze v předem zadané množině bodů (tzv. diskretizační síť) a v prostoru mezi těmito body se tyto stavové veličiny stanovují pouze interpolací. Z takto vypočtených stavových veličin se při vyhodnocování polí vypočítávají již další odvozené veličiny, v našem případě tedy u teplotních polí tepelné toky a jejich hustoty. Z uvedeného vyplývá, že programy zabývající se fyzikálními poli se mohou výrazně lišit svým naprogramováním použitím různých numerických metod pro vlastní řešení (nejčastěji se používá metoda konečných prvků označovaná FEM a metoda konečných diferencí označovaná FDM). Ze zvoleného řešení vyplývá různá rychlost a přesnost řešení. Rozdíly ve výpočtových programech také mohou

být z hlediska možností generování diskretizační sítě, která může být rovnoměrná (avšak nemusí věrně pokrývat vyšetřovanou oblast) či nerovnoměrná (jež může být např. lokálně zhuštěna, a tím umožňující přesnější výpočet v určitých místech apod.). Programy se mohou lišit i podle možností práce s materiálovými charakteristikami (u teplotních polí jsou to měrné tepelné vodivosti /podle ČSN 73 0540-1:2005 Tepelná ochrana budov – Část 1: Terminologie součinitelé tepelné vodivosti/, měrné tepelné kapacity, hustoty apod.), které mohou být konstantní, prostorově či směrově závislé (anizotropní), časově závislé, závislé na stavových veličinách vyšetřovaného pole (teplotě) či jiného fyzikálního pole (mechanické, elektromagnetické, aj.) apod. Další členění programů může být dle počtu a způsobu řešení více fyzikálních polí (tzv. sdružené úlohy), kdy na základě znalosti rozložení teplotního pole (jež mohlo být vytvořeno např. průchodem el. proudu) lze určit následné pole termoelastických deformací apod. Dalšími parametry, v nichž se mohou jednotlivé programy mezi sebou lišit, jsou již z oblasti uživatelské přívětivosti a zázemí výrobce; jedná se zejména o možnosti importu vstupních dat z různých CAD systémů a naopak exportu do dalších programů pro následné zpracování vypočtených dat, možnostech automatizování různých výpočtů (tzv. parametrické výpočty aj.), způsobu ovládání, zabudovanou databázi materiálových charakteristik a okrajových podmínek, uživatelskou podporou ze strany výrobce a mnohé další. Všem výše uvedeným aspektům samozřejmě odpovídají pořizovací a udržovací ceny programů.

Lze konstatovat, že v současnosti v ČR je ve stavebnictví nejvíce rozšířen program AREA. Ostatní programy, jako ANSYS a QuickField, jsou rozšířeny méně, existuje však mnoho dalších výpočetních programů použitelných pro řešení teplotních polí.

Pro zjištění přesnosti používaných výpočtových programů a porovnání výsledků na základě jejich výpočtových postupů byl zvolen jednoduchý stavební detail pro porovnání – a sice roh zdiva z tvarovek HELUZ P+D 490 mm. Tento detail byl postupně spočítán následujícími programy: AREA, QuickField, Comsol a FEMM, jež byly předem verifikovány podle postupu uvedeného v ČSN EN ISO 10211:2008. Vypočítané povrchové teploty se lišily maximálně o $\pm 0,04$ °C. U lineárního činitele prostupu tepla docházelo k chybám v řádech desetitisícin ψ [W/(m·K)]. Z uvedeného vyplývá, že při zaokrouhlování povrchové teploty na desetiny stupně Celsia a při zaokrouhlování lineárního činitele prostupu tepla na tisíce je možné uvedené

výsledky výpočtů v různých programech pro takto složitý tepelný most považovat za shodné. Zatím nebyla bohužel možnost obdobné srovnávací výpočty provést u tvarově složitějších detailů, jako je např. rám plastového okna či u detailů, v nichž jsou velmi slabé vrstvy jednotlivých materiálů (tzv. geometricky nesouměřitelné úlohy, jako např. plastové distanční rámečky potažené kovovou fólií). Proto nelze říci, jaká je přesnost jednotlivých programů pro tyto typy tepelných mostů, a po pravdě řečeno není ani možnost přesného ověření experimentem například i proto, že každé umístění kontaktního teploměru způsobuje lokální deformaci teplotního pole.

2.6 Vliv geometrie detailu na velikost tepelného mostu

Vlivy geometrie stavebního detailu a okrajových podmínek na výsledné parametry tepelného mostu jsou značné.

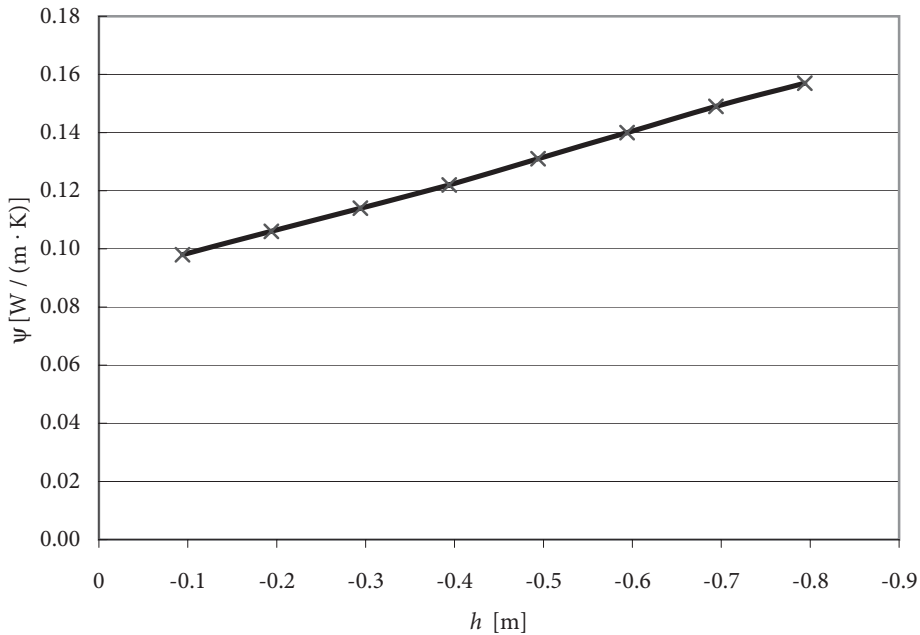
Na následujících několika vypočítaných stavebních detailech lze dokumentovat tyto závislosti.

Prvním příkladem je obvodové zdivo u základu nepodsklepené budovy. Pokud je tato budova ve svahu, dochází k tomu, že upravený terén má různou polohu vůči podlaze v objektu. Pro ilustraci jsme toto vypočítali v kroku po 100 mm od kóty upraveného terénu -0,094 m po kótu -0,794 m, tedy rozmezí 70 cm. Výsledkem je níže uvedená tabulka 1. Výsledky jsou ještě názorněji patrné z grafu 1.

Tabulka 1 – Závislost lineárního činitele prostupu tepla na úrovni terénu pod podlahou

úroveň terénu pod podlahou [m]	-0,094	-0,194	-0,294	-0,394	-0,494	-0,594	-0,694	-0,794
lineární činitel prostupu tepla z interiéru ψ [W/(m·K)]	0,098	0,106	0,114	0,122	0,131	0,140	0,149	0,157

Graf 1 – Závislost lineárního činitele prostupu tepla na úrovni terénu pod podlahou



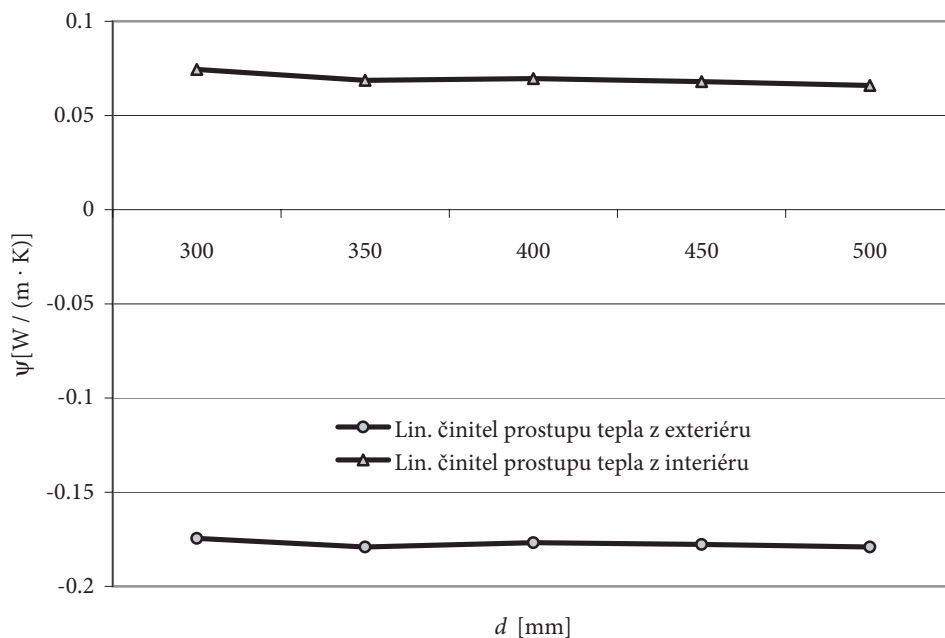
Další příklady se zabývají rohem budovy, tedy styku dvou stěn. Je zde vyjádřena závislost tepelného mostu na tloušťce konstrukce, na velikosti součinitele prostupu tepla či tepelné vodivosti.

V tabulce 2 je uvedena závislost lineárního činitele prostupu tepla na tloušťce zdiva při konstantní tepelné vodivosti. Toto je také patrné z grafu 2.

Tabulka 2 – závislost lineárního činitele prostupu tepla na tloušťce zdiva při konstantní tepelné vodivosti

Parametr	Tloušťka zdiva [mm]				
	300	350	400	450	500
Lineární činitel prostupu tepla z exteriéru ψ_e [W/(m·K)]	-0,175	-0,179	-0,177	-0,178	-0,180
Lineární činitel prostupu tepla z interiéru ψ_i [W/(m·K)]	0,074	0,069	0,070	0,068	0,066

Graf 2 – závislost lineárního činitele prostupu tepla na tloušťce zdiva při konstantní tepelné vodivosti

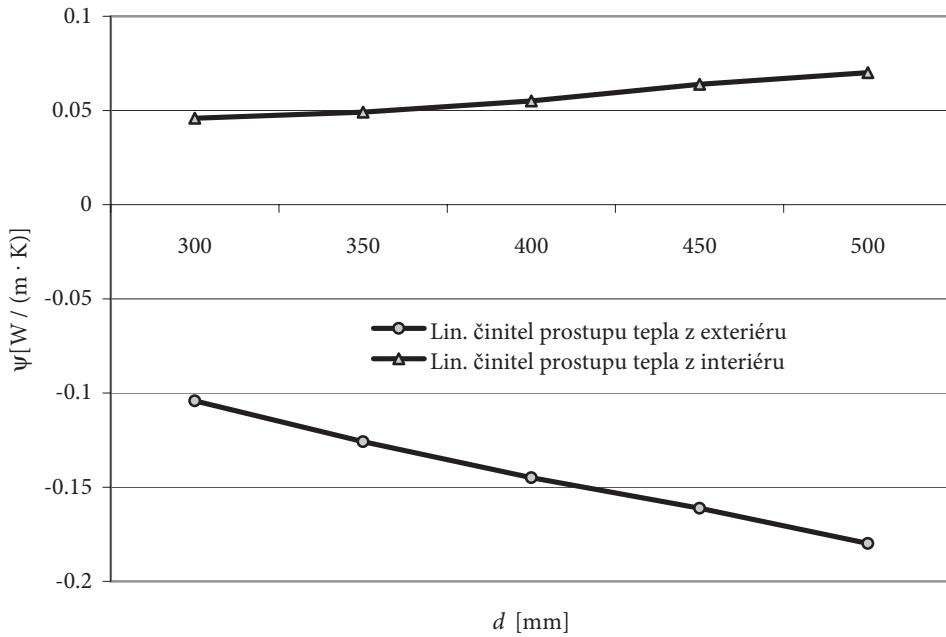


V tabulce 3 je uvedena závislost lineárního činitele prostupu tepla na tloušťce zdiva při konstantním součiniteli prostupu tepla. Toto je také patrné z grafu 3.

Tabulka 3 – závislost lineárního činitele prostupu tepla na tloušťce zdiva při konstantním součiniteli prostupu tepla

Parametr	Tloušťka zdiva [mm]				
	300	350	400	450	500
Lineární činitel prostupu tepla z exteriéru ψ_e [W/(m·K)]	-0,10415	-0,12587	-0,14493	-0,16114	-0,1799
Lineární činitel prostupu tepla z interiéru ψ_i [W/(m·K)]	0,04585	0,04913	0,05507	0,06386	0,0701

Graf 3 – závislost lineárního činitele prostupu tepla na tloušťce zdiva při konstantním součiniteli prostupu tepla

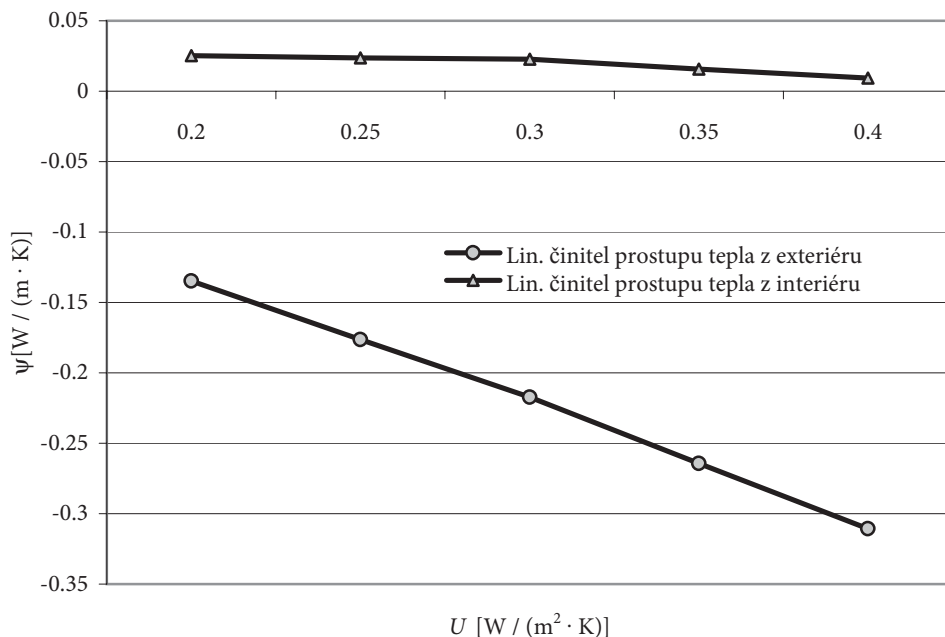


V tabulce 4 je uvedena závislost lineárního činitele prostupu tepla na součiniteli prostupu tepla při konstantní tloušťce zdiva. Toto je také patrné z grafu 4.

Tabulka 4 – závislost lineárního činitele prostupu tepla na součiniteli prostupu tepla při konstantní tloušťce zdiva

Parametr	Součinitel prostupu tepla U [W/m ² ·K]				
	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
Lineární činitel prostupu tepla z exteriéru ψ_e [W/(m·K)]	-0,13466	-0,17646	-0,21729	-0,26428	-0,31066
Lineární činitel prostupu tepla z interiéru ψ_i [W/(m·K)]	0,02534	0,02354	0,02271	0,01572	0,00934

Graf 4 – závislost lineárního činitele prostupu tepla na součiniteli prostupu tepla při konstantní tloušťce zdiva



Z uvedených grafů i tabulek je patrné, že i když má konstrukce stejnou tloušťku či jakýkoliv jiný parametr, lineární činitel prostupu tepla se mění v závislosti na dalších proměnlivých vstupních údajích.

Toto je velmi důležitá informace – jasně dokládá, že jakékoliv dva tepelné mosty jsou neporovnatelné, pokud nejsou známy veškeré další parametry. Z toho také plyne, že není možné přejímat parametry tepelného mostu z jedné konstrukční soustavy do jiné. Přejímání brání navíc to, že obvykle bývají stavební detaily řešeny mírně odlišně, takže není ani možné jejich porovnání. Jako příklad může sloužit osazení okenního rámu do zdiva. Na tento tepelný most má vliv nejenom druh zdiva, ale také druh okenního rámu, velikost spáry mezi okenním rámem a ostěním, hloubka zapuštění okna do stěny, druh kotvení (zejména zakládací lišta) a v neposlední řadě i druh omítky, parapetu, případné další doplňkové zateplení a podobně.

2.7 Požadavky normy na tepelné izolace

Požadavky na tepelné izolace jsou stanoveny v příslušných vyhláškách, přesnou podobu a velikost jednotlivých hodnot však rozpracovávají technické normy, v tomto

případě konkrétně ČSN 73 0540–2:2007 Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky. V době psaní této knížky platí znění z dubna 2007. V této normě je stanoveno 10 požadavků na stavbu z hlediska tepelných izolací, přitom jeden požadavek je doporučený.

Poslední platné znění normy ČSN 73 0540–2 z dubna 2007 obsahuje tyto požadavky:

1. **nejnižší vnitřní povrchová teplota θ_{si}**
2. **maximální součinitel prostupu tepla U**
3. **maximální lineární činitel prostupu tepla ψ_k**
4. **maximální bodový činitel prostupu tepla χ_j**
5. **maximální součinitel spárové průvzdušnosti i_{LV}**
6. **maximální průměrný součinitel prostupu tepla U_{em}**
7. **maximální pokles dotykové teploty podlahy $\Delta\theta_{10}$**
8. **maximální zkondenzované množství vodní páry v konstrukci G_k**
9. **tepelná stabilita místnosti v letním a v zimním období $\Delta\theta_{ai,max}$**
10. **maximální intenzita výměny vzduchu v místnosti (doporučeno) n_{50}**

V této knize není možné citovat přesně normu, neboť to neumožňuje zákon, který zakazuje kopírování a šíření částí norem. Nicméně je možné uvést přibližné požadavky normy, jež platí pro obvyklé stavby, přičemž za obvyklé lze považovat stavby pro bydlení a stavby určené k trvalému pobytu osob s běžnými požadavky na mikroklíma. Upozornění: Nejsou zde uvedeny veškeré souvislosti a zcela přesné znění normy, takže pro přesnou specifikaci požadavků je nutné vždy vycházet přímo z uvedené normy a nikoliv z těchto orientačních údajů.

2.7.1. Nejnižší vnitřní povrchová teplota θ_{si}

Prvním požadavkem v ČSN 73 0540–2 je požadavek na nejnižší vnitřní povrchovou teplotu θ_{si} , který je uveden v článku 5 této normy. Na rozdíl od předchozího

hodnocení, kdy byl tento požadavek formulován pomocí minimální povrchové teploty a příslušných bezpečnostních přírážek, je v novém znění normy z dubna 2007 formulován pomocí kritického teplotního faktoru vnitřního povrchu $f_{R_{si},cr}$. V normě je uvedeno podrobné hodnocení, avšak pro běžné případy obytných budov platí tabulka požadovaného kritického teplotního faktoru, které jsou uvedeny v tabulce 5, přičemž je nutné tento požadavek opravit dle přírážek, jež jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 5 – Požadované hodnoty kritického teplotního faktoru vnitřního povrchu $f_{R_{si},cr}$ pro relativní vlhkost vnitřního vzduchu $\varphi_i = 50\%$

Konstrukce	Návrhová teplota vnitřního vzduchu θ_{ai} [°C]	Návrhová teplota venkovního vzduchu θ_e [°C]				
		-13	-15	-17	-19	-21
		Požadovaný kritický teplotní faktor vnitřního povrchu $f_{R_{si},cr}$				
Výplň otvoru	20	0,675	0,693	0,710	0,725	0,738
	21	0,682	0,700	0,715	0,730	0,742
	22	0,689	0,705	0,721	0,734	0,747
Ostatní konstrukce	20	0,776	0,789	0,801	0,811	0,820
	21	0,781	0,793	0,804	0,814	0,823
	22	0,786	0,798	0,808	0,817	0,826

Tabulka 6 – Požadované hodnoty bezpečnostní přírážky teplotního faktoru $\Delta f_{R_{si}}$

Konstrukce		Vytápění s poklesem výsledné teploty $\Delta\theta_v$ [°C]		
		$\Delta\theta_v < 2\text{ °C}$ (nepřerušované)	$2\text{ °C} \leq \Delta\theta_v \leq 5\text{ °C}$ (tlumené)	$\Delta\theta_v > 5\text{ °C}$ (přerušované)
		Bezpečnostní přírážka teplotního faktoru $\Delta f_{R_{si}}$		
Výplň otvoru Otopné těleso pod výplní otvoru	ano	-0,030	-0,015	0
	ne	0	0,015	0,030
Ostatní konstrukce	těžká	0	0,015	0,030
	lehká	0,015	0,030	0,045

POZNÁMKY

1. Splnění požadavků podle tabulek je prevencí růstu plísní a rizika povrchové kondenzace.
2. Odpor při přestupu tepla na vnitřní straně R_{si} se podle ČSN EN ISO 13788 uvažuje pro vnější výplně otvorů hodnotou $R_{si} = 0,13 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$, pro ostatní vnitřní povrchy konstrukcí zvýšenou hodnotou $R_{si} = 0,25 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$.