

Součinitel prostupu tepla

Zbyněk Svoboda, FSv ČVUT

Původní text ze skript „Stavební fyzika 31“ z roku 2004. Částečně aktualizováno v roce 2018 především s ohledem na změny v normách.

Součinitel prostupu tepla a tepelný odpor jsou základními veličinami charakterizujícími tepelně izolační vlastnosti stavebních konstrukcí.

1.1. Požadavky

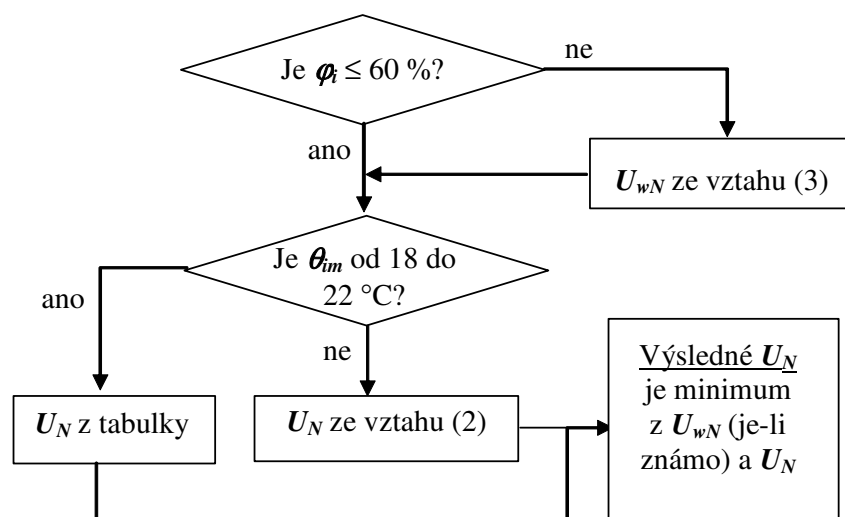
Požadavky na součinitel prostupu tepla uvádí ČSN 730540-2 v čl. 5.2. Pro každou stavební konstrukci musí být splněna podmínka

$$U \leq U_N, \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (1)$$

kde U je součinitel prostupu tepla konstrukce a U_N je jeho normou požadovaná hodnota ve $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Způsob stanovení hodnoty U_N závisí na relativní vlhkosti vnitřního vzduchu ϕ_i a na převažující návrhové vnitřní teplotě θ_{im} (jedná se o návrhovou vnitřní teplotu většiny prostor v objektu). Pokud se objekt skládá z více odlišných teplotních zón¹, stanovují se požadavky na stavební konstrukce pro každou zónu samostatně.

Pro **konstrukce v běžných objektech** s převažující návrhovou vnitřní teplotou θ_{im} od 18 do 22 °C včetně a s relativní vlhkostí ϕ_i do maximálně 60 % se pro stanovení velikosti U_N používají **tabulkové hodnoty**, které lze kromě normy najít v mnoha zdrojích na internetu, např. na webovém portálu www.tzb-info.cz. Tento způsob určení U_N je nejběžnější.



Obr. 1 Algoritmus stanovení požadované hodnoty U_N a doporučených hodnot U_{rec} a U_{pas}

Pokud je převažující návrhová vnitřní teplota θ_{im} mimo rozmezí 18 až 22 °C a relativní vlhkost ϕ_i je přitom maximálně 60%, používá se **vztah**

¹ Teplotní zóna je charakterizovaná určitou převažující vnitřní teplotou, způsobem větrání, velikostí vnitřních zisků atd. Bytové a občanské objekty jsou obvykle jednozónové. Objektem se dvěma zónami by byla například výrobní hala (1. zóna) s administrativní částí (2. zóna). Podrobnosti k zónám jsou uvedeny v EN ISO 13790.

$$U_N = U_{N,20} \cdot \frac{16}{\theta_{im} - 4}, \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (2)$$

kde $U_{N,20}$ je základní tabulková hodnota součinitele prostupu tepla a θ_{im} je převažující návrhová vnitřní teplota ve °C.

Při posuzování konstrukcí v prostorách s **relativní vlhkostí vyšší než 60 %** se požadovaná hodnota U_N stanoví jako minimum z tabulkové hodnoty (resp. ze vztahu (2)), a ze vztahu

$$U_{w,N} = \frac{0,6 \cdot (\theta_{ai} - \theta_w)}{R_{si} \cdot (\theta_{ai} - \theta_e)}, \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (3)$$

kde R_{si} je tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně v $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ (uvažuje se obvykle 0,25 $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, výjimečně jinak podle Tab. 2), θ_{ai} je návrhová teplota vnitřního vzduchu ve °C, θ_e je návrhová teplota venkovního vzduchu ve °C a θ_w je teplota rosného bodu ve °C, kterou lze stanovit např. z Tab. K.4 v ČSN 73 0540-3 nebo ze vztahů

$$\begin{aligned} \theta_w &= \frac{236 \cdot \ln p - 1513,867}{23,59 - \ln p} && \text{pro } p \geq 610,75 \text{ Pa} \\ \theta_w &= \frac{273 \cdot \ln p - 1751,21055}{28,9205 - \ln p} && \text{pro } p < 610,75 \text{ Pa.} \end{aligned} \quad [^\circ\text{C}] \quad (4)$$

kde p je částečný tlak vodní páry ve vnitřním vzduchu v Pa.

Není-li možné dosáhnout toho, aby byl součinitel prostupu tepla konstrukce nižší než hodnota $U_{w,N}$ podle vztahu (3), připouští ČSN 730540-2 nesplnění této podmínky – ovšem za předpokladu, že je alespoň dodržena požadovaná tabulková hodnota U_N (případně upravená podle vztahu (2)). Současně musí být zajištěna bezchybná funkce konstrukce při povrchové kondenzaci a vyloučeno nepříznivé působení kondenzátu na navazující konstrukce.

Pro snadnější cestu temnými zákoutími postupu určení hodnoty U_N je na Obr. 1 uveden základní algoritmus tohoto výpočtu. Stejný algoritmus i vztahy se použijí i při stanovení doporučených hodnot U_{rec} a U_{pas} .

Závěrem se ještě nutně uvést několik poznámek:

- **Sousední vytápěné byty** se pro účely stanovení požadavků na součinitel prostupu tepla považují za prostory s rozdílem teplot do 5 °C, sousední občasné vytápěné prostory se považují za temperované prostory² a sousední neužívané prostory se považují za nevytápěné prostory.
- Při **změnách dokončených budov** se splnění požadavku (1) vyžaduje pro nové konstrukce, které nenahrazují konstrukce původní. Ostatní konstrukce (např. původní stěny opatřené novou tepelnou izolací či stěny, které nahrazují původní vybourané zdivo) musí požadavek (1) splňovat tehdy, pokud tomu prokazatelně nebrání technické nebo legislativní překážky. V opačném případě musí být použito nejlepší technicky dostupné řešení tak, aby prokazatelně nedocházelo k vadám a poruchám.
- U šikmých výplní otvorů (**střešní okna**) se s normovými požadavky porovnává součinitel prostupu tepla stanovený pro předpoklad svislé polohy³ výplně otvoru, přičemž se do výsledné hodnoty zahrnuje i vliv tepelně-izolačního obkladu rámu.
- U **světlíků** se s normovými požadavky porovnává rovněž hodnota stanovená pro předpoklad jejich svislé polohy³. Součinitel prostupu tepla světlíku je přitom vždy vztažen na plochu jeho

² Temperovaný prostor je uzavřený prostor nesloužící pobytu osob, v němž je v zimním období teplota vzduchu záměrně výrazně nižší než v navazujícím prostoru vytápěném a vyšší než výpočtová teplota venkovní.

³ Reálně horší tepelně izolační vlastnosti dvojskel v šikmé či vodorovné poloze jsou u střešních oken a světlíků zohledněny mírně přísnějšími požadavky na součinitel prostupu tepla.

průmětu. Je-li teplosměnná plocha světlíku výrazně větší než plocha jeho průmětu, připouští se zvýšení požadované hodnoty podle (1) v poměru obou ploch.

- **Podlahová konstrukce přilehlá k zemině** splní požadavek na součinitel prostupu tepla i tehdy, je-li ve vzdálenosti do 2 m od obvodu budovy splněna podmínka (1) a současně je splněna i podmínka

$$\Phi_T \leq A \cdot U_N \cdot (\theta_{im} - 5), \text{ přičemž } \Phi_T = H_g \cdot (\theta_{im} - \theta_e), \quad (5)$$

kde Φ_T je tepelná ztráta prostupem tepla podlahou ve W, H_g je ustálený měrný tepelný tok prostupem tepla podlahou přilehlou k zemině podle ČSN EN ISO 13370 včetně vlivu zeminy a případných okrajových tepelných izolací ve W/K, θ_{im} je převažující návrhová vnitřní teplota ve °C, θ_e je návrhová venkovní teplota v zimním období ve °C, A je plocha podlahy stanovená z vnějších rozměrů v m² a U_N je požadovaný součinitel prostupu tepla podlahy přilehlé k zemině ve W/(m²·K).

Tento alternativní postup se dá s výhodou použít především v případě hodnocení podlah plošně rozsáhlých budov, u nichž hraje rozhodující úlohu řešení okrajových zón, zatímco tloušťka tepelné izolace v ploše podlahy nebývá zásadní.

- Požadované a doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla ze vztahů (2) a (3) a z Tab. 1 se do 0,40 W/(m²·K) zaokrouhlují na setiny, od 0,4 W/(m²·K) včetně do 2,0 W/(m²·K) na pět setin a nad 2,0 W/(m²·K) včetně na desetiny.
- Pokud ve výjimečném případě není prokazatelně možné dosáhnout odpovídající požadované hodnoty součinitele prostupu tepla, musí to být odborně písemně zdůvodněno a musí být zvoleno nejlepší možné technické řešení - nejméně tak, aby prokazatelně nedocházelo k vadám a poruchám při užívání.

1.2. Postup výpočtu

1.2.1. Neprůsvitné konstrukce

Výpočet součinitele prostupu tepla stavební konstrukce je zdánlivě jednoduchá úloha. Platí to ovšem pouze v případě vrstvených konstrukcí bez systematických (pravidelně se opakujících) tepelných mostů. Jakmile se v konstrukci opakují tepelné mosty (např. krokve v zateplené šikmé střeše), je nutné jejich vliv do výsledné hodnoty součinitele prostupu zahrnout. Zcela jasně to požaduje i ČSN 730540-2. Než se ale budeme podrobněji zabývat konstrukcemi s tepelnými mosty, podívejme se nejprve v rychlosti na konstrukce bez nich.

1.2.1.1. Konstrukce bez systematických tepelných mostů

Součinitel prostupu tepla plošné konstrukce bez systematických tepelných mostů se stanoví

$$U = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}}, \quad [W/(m^2 \cdot K)] \quad (6)$$

kde R_{si} a R_{se} jsou tepelné odpory při přestupu tepla na vnitřní a vnější straně v m²·K/W podle Tab. 2 a R je tepelný odpor konstrukce, který lze určit ze známého vztahu jako

$$R = \sum \frac{d}{\lambda}, \quad [m^2 \cdot K/W] \quad (7)$$

kde d je tloušťka vrstvy konstrukce⁴ v m a λ je její tepelná vodivost ve W/(m·K). Stručně připomeňme, že do tepelného odporu se standardně započítávají pouze ty vrstvy, které jsou účinně **chráněny před účinky vlhkosti** (tedy u střech vrstvy pod hydroizolací s výjimkou extrudovaného polystyrenu u obrácených skladeb, u podlah na zemině vrstvy nad hydroizolací

⁴ Postup stanovení tepelně efektivní tloušťky vrstev s proměnnou tloušťkou (např. spádových vrstev ve střechách) uvádí ČSN EN ISO 6946.

apod.). U dvouplášťových konstrukcí se do tepelného odporu započítávají pouze vrstvy **vnitřního pláště** (tj. vrstvy mezi interiérem a větranou vzduchovou vrstvou).

1.2.1.2. Konstrukce se slabě větranými vzduchovými vrstvami

U konstrukcí se **slabě větranými vzduchovými vrstvami** by se mělo postupovat podle změny ČSN EN ISO 6946 (2008) a použít pro výpočet součinitele prostupu tepla vztah

$$U = \left(\frac{1500 - A_v}{1000} R_{Tu} + \frac{A_v - 500}{1000} R_{Tv} \right)^{-1} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (8)$$

kde A_v je plocha větracích otvorů do vzduchové vrstvy v mm^2 , R_{Tu} je tepelný odpor při prostupu tepla stanovený pro konstrukci s nevětranou vzduchovou vrstvou v $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ a R_{Tv} je tepelný odpor při prostupu tepla stanovený pro konstrukci se silně větranou vzduchovou vrstvou v $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Uvedený vztah má ovšem řadu problémů a použít jej nelze zcela univerzálně. Podrobnější diskusi k tomuto tématu lze nalézt v části **Vlastnosti materiálů**.

Tab. 1: Tepelné odpory při přestupu tepla

Povrch	Účel výpočtu	Konstrukce / povrch	Tepelný odpor při přestupu tepla	Součinitel přestupu tepla
			R_{si}, R_{se} [m ² .K/W]	h_i, h_e [W/(m ² .K)]
vnější ⁵	souč. prostupu tepla, povrchové teploty	jednoplášťová	0,04	1/ R_s
		dvouplášťová	stejně jako R_{si}	
zemina		styk se zeminou	0	
vnitřní ⁶	souč. prostupu tepla, tepelné toky	stěna (horizont. tep. tok)	0,13	
		střecha (tep. tok vzhůru)	0,10	
		podlaha (tep. tok dolů)	0,17	
	povrchové teploty	výplně otvorů	0,13	
		ostatní konstrukce	0,25	
		Další informativní hodnoty:		
		horní polovina místnosti	0,25	
		dolní polovina místnosti	0,35	
		stínění nábytkem	0,50	

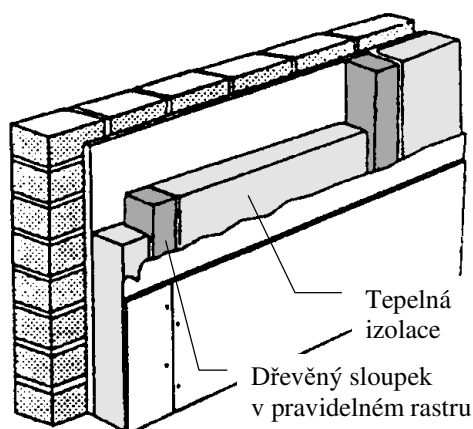
1.2.1.3. Konstrukce se systematickými tepelnými mosty

Součinitel prostupu tepla konstrukce se systematickými tepelnými mosty (Obr. 2) lze vypočítat dvěma způsoby. První způsob – **přesný výpočet** – je možné použít obecně pro jakoukoli konstrukci⁷. Vychází se totiž z řešení vícerozměrného teplotního pole (obvykle dvourozměrného) v charakteristickém výseku konstrukce. Zvolený výsek (Obr. 3) se vyhodnotí s pomocí vhodného software pro řešení teplotních polí, přičemž geometrie detailu a vlastnosti jeho dílčích částí se zadávají podle pravidel pro modelování tepelných mostů.

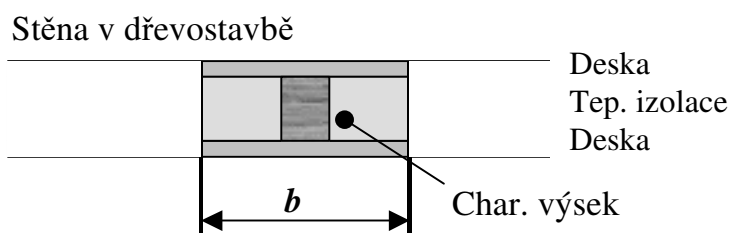
⁵ Uvedené hodnoty platí pro zimní období. Pro letní období se obvykle uvažuje tepelný odpor při přestupu na vnější straně $0,075 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

⁶ Hodnoty platí pro běžnou emisivitu vnitřního povrchu 0,9. Je-li emisivita vnitřního povrchu jiná, lze pro účely výpočtu tepelných toků použít výpočet tepelného odporu při přestupu tepla podle EN ISO 6946.

⁷ Tento postup se používá např. i při výpočtu součinitele prostupu tepla zdíva podle ČSN EN 1745.



Obr. 2 Příklad konstrukce se systematickými tepelnými mosty



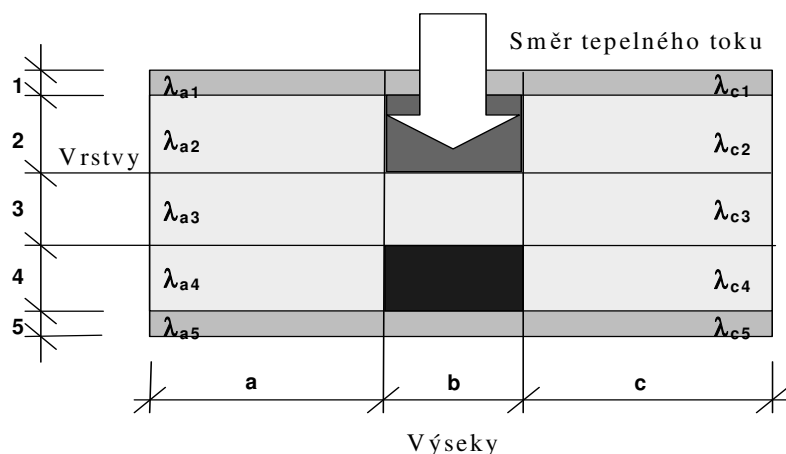
Obr. 3 Charakteristický výsek konstrukce

Důležitá je volba okrajových podmínek. Teplotní pole se totiž v tomto případě stanovuje zásadně jen pro dvě působící okrajové teploty. Na straně interiéru se používá návrhová vnitřní teplota a na straně exteriéru návrhová venkovní teplota. Zvláště pozorně je třeba zadávat tepelné odpory při přestupu tepla, které by měly být voleny v souladu s typem výpočtu podle Tab. 2 (na straně interiéru se používají hodnoty $R_{si} = 0,10 / 0,13 / 0,17 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$). Jakmile je k dispozici dvourozměrné teplotní pole v charakteristickém výseku konstrukce, lze její součinitel prostupu tepla vyjádřit ze vztahu

$$U = \frac{1}{b} \cdot \frac{\Phi}{\theta_i - \theta_e} = \frac{L}{b}, \quad [\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})] \quad (9)$$

kde b je šířka hodnoceného výseku v m (Obr. 3), Φ je vypočtená hustota tepelného toku ve W/m, θ_i a θ_e jsou návrhové vnitřní a venkovní teploty ve °C a L je tepelná propustnost výsekem konstrukce ve W/(m.K). Veličiny Φ a L uvádí např. program Area v protokolu o výpočtu.

Druhý způsob výpočtu součinitele prostupu tepla, který je definován v ČSN EN ISO 6946, je **přibližný** a může se použít jen tehdy, pokud nejsou tepelné mosty tvořeny kovovými prvky. Jeho výsledky jsou vždy zatíženy určitou chybou, která může být téměř zanedbatelná, ale i dosti značná. Prvním krokem tohoto výpočtu je rozdělení charakteristického výseku konstrukce s tepelným mostem na dílčí části podle schématu na Obr. 4.



Obr. 4 Rozdělení výseku konstrukce na části

Součinitel prostupu tepla včetně vlivu tepelného mostu lze pak stanovit jako

$$U = \frac{2}{R'_T + R''_T}, \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (10)$$

kde R'_T je horní mez a R''_T dolní mez tepelného odporu při prostupu tepla v $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Hodnotu R'_T lze stanovit ze vztahu

$$R'_T = \left(\frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + \dots + \frac{f_q}{R_{Tq}} \right)^{-1}, \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}] \quad (11)$$

kde f_a až f_q jsou poměrné plochy dílčích výseků hodnocené konstrukce a R_{Ta} až R_{Tq} jsou tepelné odpory při prostupu tepla v $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ stanovené ve směru tepelného toku pro každý dílčí výsek. Součet všech poměrných ploch dílčích výseků musí být roven 1, přičemž poměrná plocha x -tého výseku f_x je definována jako

$$f_x = \frac{A_x}{A}, \quad [-] \quad (12)$$

kde A_x je plocha x -tého výseku v m^2 a A je celková plocha hodnocené konstrukce v m^2 (ve směru kolmém na směr tepelného toku). Hodnota R''_T ze vztahu (10) je definována jako

$$R''_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}, \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}] \quad (13)$$

kde R_{si} a R_{se} jsou tepelné odpory při přestupu na vnitřní a vnější straně v $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ (Tab. 2) a R_1 až R_n jsou ekvivalentní tepelné odpory jednotlivých vrstev kolmých na směr tepelného toku v $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Tyto hodnoty lze určit ze vztahu

$$R_j = \left(\frac{f_a}{R_{aj}} + \frac{f_b}{R_{bj}} + \dots + \frac{f_q}{R_{qj}} \right)^{-1}, \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}] \quad (14)$$

kde R_{aj} až R_{qj} jsou tepelné odpory j -té vrstvy kolmé na směr tepelného toku ve výsecích a až q .

Maximální chybu vzniklou použitím vztahu (10) uvádí ČSN EN ISO 6946 jako

$$e = 100 \cdot \frac{R'_T - R''_T}{2} \cdot U. \quad [\%] \quad (15)$$

Přibližný způsob výpočtu je sice postupem určeným pro ruční počítání, ale na první pohled může i mírně vyděsit. Naštěstí není vždy nutné pronikat do jeho podstaty, protože existuje řada alternativních možností – např. využit vhodný software, který s tímto postupem počítá⁸.

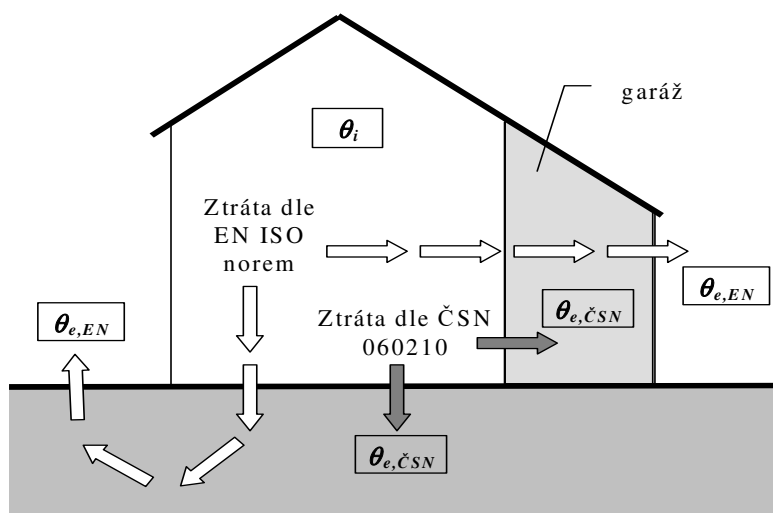
⁸ V kapitole 1.3 je uveden příklad výpočtu s pomocí programu Teplo.

1.2.1.4. Konstrukce ve styku se zemínou

Postup výpočtu součinitele prostupu tepla konstrukcí ve styku se zemínou je možný dvojitý, přičemž jeho výsledky se mohou i dosti dramaticky lišit. Proč tomu tak je, lze ukázat nejlépe na výpočtu tepelné ztráty prostupem konstrukcí v kontaktu se zemínou. Použijme tradiční vztah

$$\Phi_T = A \cdot U \cdot (\theta_i - \theta_e), \quad [\text{W}] \quad (16)$$

kde A je plocha konstrukce v m^2 , U je její součinitel prostupu tepla ve $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, θ_i je návrhová vnitřní teplota ve $^\circ\text{C}$ a θ_e je teplota na vnější straně konstrukce ve $^\circ\text{C}$. Veličinou, o kterou se budeme zajímat více, je právě poslední jmenovaná teplota. V ČR se tradičně za hodnotu θ_e ve vztahu (16) dosazovala a dosud občas dosazuje teplota bezprostředně na vnější straně konstrukce. Pokud tedy máme např. podlahu na zemině, dosadí se za θ_e odhadnutá teplota v zemině pod podlahou. Součinitel prostupu tepla U pak v tomto případě vyjadřuje jen vlastnosti samotné podlahy. V novějších evropských normách z počátku 21. století se prosadil jiný přístup k veličině θ_e . Tato hodnota se v nich zásadně ztotožňuje s návrhovou venkovní teplotou – jinými slovy: už se nepočítá tepelná ztráta např. z interiéru přes podlahu do zemin, ale tepelná ztráta z interiéru do exteriéru přes podlahu a zeminu. Součinitel prostupu tepla U pak musí ovšem vyjadřovat v jediném čísle vlastnosti konstrukce i přilehlé zeminu.

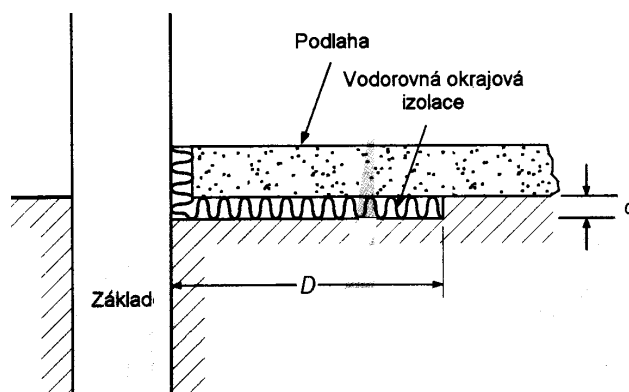


Obr. 5 Tepelné ztráty prostupem podle tradiční (a již neplatné) ČSN 060210 a podle novějších EN ISO norem

Součinitel prostupu tepla konstrukce ve styku se zemínou se **bez vlivu zeminu** stanoví ze vztahu (6), přičemž se použijí tepelné odpory při přestupu tepla podle Tab. 2. Vypočtená hodnota se porovnává s požadavkem ČSN 730540-2 uvedeným v kapitole 1.1⁹. Používala se také při stanovení tepelných ztrát podle starší a již neplatné ČSN 060210 (1994) – vždy ovšem v kombinaci s předpokládanou teplotou v zemině¹⁰.

⁹ Alternativně lze od roku 2007 použít pro hodnocení splnění požadavku na součinitel prostupu tepla podlah na zemině i metodiku ČSN EN ISO 13370. Podrobnosti jsou uvedeny v poznámce na straně 4 tohoto dokumentu.

¹⁰ Tento přístup se změnil v souvislosti s přechodem na výpočty tepelných ztrát místností podle evropské normy ČSN EN ISO 12831.



Obr. 6 Přídavná okrajová izolace

Součinitel prostupu tepla konstrukce v kontaktu s terénem se **s vlivem zeminy** stanovuje podle ČSN EN ISO 13370. V této normě jsou uvedeny postupy pro čtyři základní typy konstrukcí ve styku se zemínou. Jedná se o:

- podlahy na zemině (s okrajovou svislou či vodorovnou přídavnou izolací či bez ní)
- zvýšené podlahy (tj. podlahy nad větraným průlezným prostorem)
- vytápěné suterény
- a nevytápěné suterény.

Pro každou z uvedených konstrukcí se stanovuje jediná hodnota součinitele prostupu tepla, která zahrnuje vliv podlahové konstrukce, vliv zeminy a v případě suterénů i vliv suterénních stěn a větrání.

Výpočtové postupy z ČSN EN ISO 13370 jsou poměrně obsáhlé, není je proto bohužel možné všechny zde uvést. Podívejme se ale alespoň na nejjednodušší případ – na **podlahu na zemině**. Součinitel prostupu tepla se pro tuto konstrukci určí ze vztahu

$$U = U_0 + 2 \frac{\psi_g}{B'}, \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (17)$$

přičemž základní hodnota součinitele prostupu tepla U_0 se stanoví jako

$$U_0 = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot B' + d_t} \cdot \ln \left(\frac{\pi \cdot B'}{d_t} + 1 \right) \quad \text{pro } d_t < B' \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (18)$$

$$U_0 = \frac{\lambda}{0,457 \cdot B' + d_t} \quad \text{pro } d_t \geq B'.$$

Hodnota λ je tepelná vodivost zeminy (obvykle $2,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$). Hodnota d_t je ekvivalentní tloušťka podlahy, která se stanoví ze vztahu

$$d_t = w + \lambda \cdot (R_{si} + R_f + R_{se}), \quad [\text{m}] \quad (19)$$

kde w je tloušťka stěn v m, R_{si} a R_{se} jsou tepelné odpory při přestupu tepla na vnitřní a vnější straně v $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ podle Tab. 2 (obvykle $0,17$ a $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$) a R_f je tepelný odpor podlahy. Zbývá charakteristický rozměr podlahy B' , který se určí jako

$$B' = \frac{A}{0,5 \cdot P}, \quad [\text{m}] \quad (20)$$

kde A je plocha podlahy v m^2 a P je exponovaný obvod podlahy v m (odpovídá celkové délce stěn oddělujících interiér od vnějšího prostředí či přilehlých nevytápěných prostorů¹¹). Poslední neuvedená veličina je korekce na vliv okrajové tepelné izolace (vodorovné nebo svislé), kterou lze

¹¹ Nezapočítávají se tedy délky stěn sousedících s vytápěnými prostory (např. u řadových domů).

stanovit¹²

$$\psi_g = -\frac{\lambda}{\pi} \left[\ln \left(\frac{D}{d_t} + 1 \right) - \ln \left(\frac{D}{d_t + d'} + 1 \right) \right] \quad \text{pro vodorovnou okrajovou izolaci} \quad [W/(m.K)] \quad (21)$$

$$\psi_g = -\frac{\lambda}{\pi} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot D}{d_t} + 1 \right) - \ln \left(\frac{2 \cdot D}{d_t + d'} + 1 \right) \right] \quad \text{pro svislou okrajovou izolaci}$$

kde **D** je šířka vodorovné nebo hloubka svislé přídavné okrajové tepelné izolace v m (Obr. 6) a **d'** je efektivní tloušťka, která se stanoví ze vztahu

$$d' = \lambda \cdot \left(R_n - \frac{d_n}{\lambda} \right), \quad [m] \quad (22)$$

kde **λ** je tepelná vodivost zeminy ve W/(m.K), **R_n** je tepelný odpor přídavné tepelné izolace v m².K/W a **d_n** je její tloušťka v m.

Vypočtená hodnota součinitele prostupu tepla s vlivem zeminy se používá při výpočtech tepelných ztrát a energetické náročnosti budov podle evropských norem – a to vždy v kombinaci s teplotou vnějšího vzduchu¹³.

1.2.1.5. Konstrukce ve styku s nevytápěnými prostory

U konstrukcí ve styku s nevytápěnými prostory je situace podobná jako u konstrukcí ve styku se zemínou – opět se jejich součinitel prostupu tepla stanovuje dvěma způsoby v závislosti na tom, s jakým teplotním rozdílem se počítá při stanovení tepelné ztráty prostupem (viz úvod kap. 1.2.1.4).

Součinitel prostupu tepla **bez vlivu přilehlého prostoru** se stanoví ze vztahu (6), přičemž se použijí tepelné odpory při přestupu podle Tab. 2. Vypočtená hodnota se porovnává s požadavkem ČSN 730540-2 uvedeným v kapitole 1.1. Používala se také při stanovení tepelných ztrát podle starší a již neplatné ČSN 060210 – samozřejmě vždy v kombinaci s předpokládanou teplotou v nevytápěném prostoru¹⁴.

Tab. 2: Tepelný odpor podstřešních prostorů

Popis střechy	Přídavný tepelný odpor R _u [m ² .K/W]
Střecha s taškovou krytinou, bez pojistné hydroizolace a bednění	0,06
Střecha s těsnou krytinou, nebo skládanou krytinou s pojistnou hydroizolací či bedněním	0,20
Plochá dvouplášťová střecha (bednění + hydroizolace)	0,30

Součinitel prostupu tepla **s vlivem nevytápěného prostoru** se stanovuje přibližně podle ČSN EN ISO 6496 nebo přesněji podle ČSN EN ISO 13789. Vzhledem k omezenému rozsahu těchto skript se podíváme stručně jen na přibližný postup, který lze použít pro přirozeně větrané přilehlé

¹² Pokud okrajová izolace není použita, je korekce samozřejmě nulová.

¹³ Součinitel prostupu tepla konstrukce v kontaktu se zemínou stanovený podle ČSN EN ISO 13370 je díky zahrnutí vlivu zeminy jakousi ekvivalentní hodnotou, kterou nelze nikdy použít přímo pro srovnání s normovým požadavkem. Má smysl pouze jako mezivýsledek, který se použije dále pro stanovení (měrné) tepelné ztráty prostupem. Na tuto skutečnost se vyplatí nezapomínat – při použití vztahů z ČSN EN ISO 13370 lze totiž dojít až k neuvěřitelně nízkým hodnotám součinitele prostupu tepla, a to i při zcela tepelně neizolovaných podlahách (mají-li velkou a kompaktní plochu). Takto stanovená hodnota součinitele prostupu tepla uvedená samostatně a bez souvislosti pak působí poněkud nereálně a překvapivě. A to oprávněně – ve skutečnosti totiž opravdu nejde o vlastnost podlahy či suterénní stěny, ale o jednoduché souhrnné vyjádření jednotkového prostupu tepla komplexní sestavou konstrukce a zeminy.

¹⁴ Tento přístup se změnil v souvislosti s přechodem na výpočty tepelných ztrát místností podle evropské normy ČSN EN ISO 12831.

prostory. Přilehlý nevytápěný prostor se zohledňuje prostřednictvím přidavného tepelného odporu R_u , který se přičte k tepelnému odporu konstrukce a který lze stanovit buď z Tab. 3 nebo ze vztahu

$$R_u = \frac{A_i}{\sum A_{e,j} \cdot U_{e,j} + 0,33 \cdot n \cdot V}, \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K/W}] \quad (23)$$

kde A_i je plocha všech konstrukcí mezi interiérem a nevytápěným prostorem v m^2 , $A_{e,j}$ je plocha j-té konstrukce mezi nevytápěným prostorem a exteriérem v m^2 , $U_{e,j}$ je součinitel prostupu tepla této konstrukce ve $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, n je intenzita větrání nevytápěného prostoru v $1/\text{h}$ a V je objem nevytápěného prostoru v m^3 . Nejsou-li známy podrobnosti o nevytápěném prostoru, lze podle ČSN EN ISO 6946 použít hodnoty $U_{e,j} = 2,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ a $n = 3 \text{ h}^{-1}$. Výsledný součinitel prostupu tepla s vlivem nevytápěného prostoru se používá při výpočtech tepelných ztrát a energetické náročnosti budov podle evropských norem – a to vždy v kombinaci s teplotou vnějšího vzduchu.

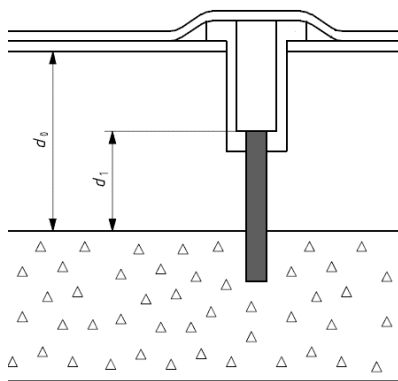
1.2.1.6. Přirážky k součiniteli prostupu tepla

Zbývá zmínit se ještě o korekčních přirážkách k součiniteli prostupu tepla, které jsou definovány v EN ISO 6946. Tyto přirážky vyjadřují různé nepříznivé vlivy a přičítají se k vypočtenému součiniteli prostupu tepla (pokud již v něm nejsou zahrnuté). První přirážka se vztahuje k **mechanickým kotvám** procházejícím tepelnou izolací a stanoví se ze vztahu

$$\Delta U_f = \alpha \frac{\lambda_f \cdot n_f \cdot A_f}{d_0} \cdot \left(\frac{R_1}{R_{T,h}} \right)^2, \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (24)$$

kde α je součinitel typu kotvy (0,8 pro kotvy procházející celou tloušťkou tepelné izolace a $0,8 \cdot d_1/d_0$ pro kotvy částečně zapuštěné do tepelné izolace podle Obr. 7), λ_f je tepelná vodivost kotvy ve $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, n_f je počet kotev v 1 m^2 , A_f je průřezová plocha kotvy v m^2 , d_0 je tloušťka tepelné izolace s kotvou v m, R_1 je tepelný odpor izolace s kotvou v $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ a $R_{T,h}$ je tepelný odpor při prostupu tepla celé konstrukce bez vlivu kotev v $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$.

Korekce na vliv kotev se neuvažuje, pokud má kotva tepelnou vodivost nižší než $1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})^{15}$ a pokud kotva prochází i vzduchovou dutinou.



Obr. 7 Schéma zapuštěné kotvy

Pokud kotva spojuje dvě kovové vrstvy, nelze vztah (24) použít - součinitel prostupu tepla je nutné vypočítat s pomocí řešení teplotního pole podle kapitoly 1.2.1.3. V takovém případě se pak přirážka na vliv bodových kotev stanoví s pomocí vypočteného bodového činitele prostupu tepla ze vztahu

$$\Delta U_f = n \cdot \chi, \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (25)$$

kde n je počet kotev v 1 m^2 a χ je bodový činitel prostupu tepla stanovený 3D numerickým výpočtem ve W/K .

¹⁵ Např. plastový kotevní prvek.

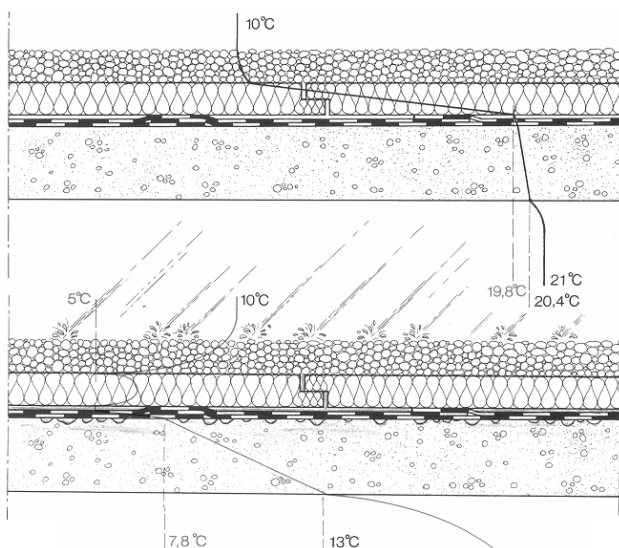
Další korekční přírážkou je korekce na vliv **vzduchových mezer** (netěsností) **v tepelných izolacích**. Pokud jsou tepelné izolace prováděny beze spár či ve více vrstvách, tato přírážka se neuvažuje. V ostatních případech se stanoví jako

$$\Delta U_g = \Delta U'' \left(\frac{R_1}{R_T} \right)^2, \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (26)$$

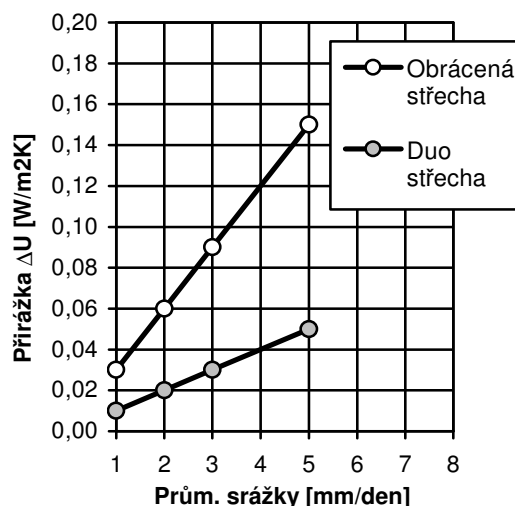
kde $\Delta U''$ je pomocný parametr, který se uvažuje:

- 0,01 W/(m².K) pro spáry v tepelné izolaci, které spojují studenou a teplou stranu izolace, ale neumožňují cirkulaci vzduchu mezi oběma stranami izolace (např. kvalitně provedené izolace mezi krokvemi a sloupky a jiné izolace v jedné vrstvě se spoji na sraz)
- 0,04 W/(m².K) pro spáry v tepelné izolaci, které spojují studenou a teplou stranu izolace, a umožňují cirkulaci vzduchu mezi oběma stranami izolace (např. nekvalitně provedené izolace s většími netěsnostmi),

R_T je tepelný odpor při prostupu tepla celé konstrukce bez vlivu netěsností v m².K/W a R_1 je tepelný odpor tepelné izolace s netěsnostmi (stanovený ovšem bez jejich vlivu) v m².K/W. Korekce podle vztahu (26) je pro dobře provedené konstrukce dosti malá – např. pro šikmé střechy s jednovrstvou tepelnou izolací o tloušťce 100 až 160 mm mezi krokvemi činí jen zhruba 0,01 W/(m².K).



Obr. 8 Průběh teplot v obrácené střeše na jaře za sucha a při dešti podle //



Obr. 9 Korekční přírážka na vliv srážek u obrácené střechy a u duo-střechy¹⁶

Poslední korekční přírážkou je přírážka na **vliv srážek u obrácených střech**, která se stanovuje ze vztahu

$$\Delta U = p \cdot f \cdot x \cdot \left(\frac{R_1}{R_T} \right)^2, \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (27)$$

kde p je průměrná míra srážek v mm/den během otopného období (ČSN 730540-3 uvádí pro ČR rozmezí 1,2 až 4 mm/den s tím, že vyšší srážky lze obecně zaznamenat ve vyšších nadmořských výškách), f je odtokový činitel udávající podíl srážek pronikajících k hydroizolaci (pro jednovrstvý XPS s tupými spoji a přitížením bez geotextilie uvádí ČSN EN ISO 6946 hodnotu 83 %, u sofistikovanějších řešení lze dosáhnout výrazně nižších podílů – např. XPS překrytý difúzně otevřenou drenážní folií vykazuje odtokový činitel pouhých 5 %), x je činitel zvýšení tepelných ztrát (uvažuje se 0,0481 W.den/(m².K.mm)), R_1 je tepelný odpor vrstvy extrudovaného polystyrenu nad

¹⁶ Pro obrácenou střechu byl uvažován tepelný odpor extrudovaného polystyrenu 4,4 m².K/W, pro duo-střechu 3,0 m².K/W. Celkový tepelný odpor střechy byl v obou případech 5,0 m².K/W. U desek XPS byly předpokládány nejméně příznivé tupé spoje, bez překrytí drenážní folií.

hydroizolací a R_T je tepelný odpor při prostupu tepla střešní konstrukce bez vlivu korekce v $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$.

Zhoršení součinitele prostupu tepla vlivem srážek (Obr. 8 a Obr. 9) může být u běžných obrácených střech velmi nepříjemné – a to hlavně v lokalitách, pro které je v zimním období charakteristický spíše výskyt dešťů než sněhu. Střechy se v těchto místech doporučuje provádět raději v tzv. duo variantě¹⁷ - zvláště pak tehdy, pokud má nosná konstrukce malou tepelnou setrvačnost a tepelný odpor.

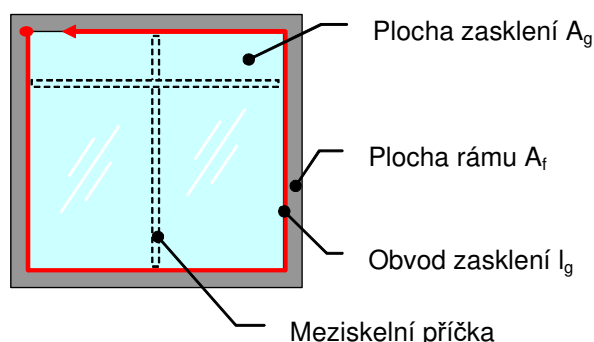
1.2.2. Okna a dveře

Postup výpočtu součinitele prostupu tepla oken a dveří je uveden v ČSN EN ISO 10077-1 a 2. Vzhledem k omezenému rozsahu skript se podrobněji podíváme jen na nejběžnější jednoduchá okna s dvojsklem či trojsklem. Výpočetní postupy pro ostatní okna (dvojitá a zdvojená) a pro započtení vlivu okenic najde laskavý čtenář v citovaných normách.

Součinitel prostupu tepla jednoduchého okna se stanoví ze vztahu

$$U_w = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + l_g \cdot \psi_g + l_{gb} \cdot \psi_{gb}}{A_g + A_f}, \quad [\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})] \quad (28)$$

kde A_g a A_f jsou plochy zasklení a rámu při pohledu na okno v m^2 (Obr. 10), U_g a U_f jsou součinitele prostupu tepla zasklení a rámu ve $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, l_g je celkový viditelný obvod zasklení v m, ψ_g je lineární činitel prostupu tepla v uložení zasklení do rámu ve $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, l_{gb} je celková délka meziskelních příček ve zasklívací jednotce v m a ψ_{gb} je lineární činitel prostupu tepla pro meziskelní příčku $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.



Obr. 10 Schéma okenní konstrukce

Pokud je plocha zasklení různá při pohledu z interiéru a z exteriéru, uvažuje se ve výpočtu vždy plocha menší. U plochy rámu je tomu naopak. Obvod zasklení se uvažuje stejně jako plocha rámu, tedy – je-li obvod zasklení různý při pohledu z interiéru a z exteriéru, uvažuje se vždy vyšší hodnotou, aby byl výsledek výpočtu součinitele prostupu tepla na straně bezpečnosti.

Vztah (28) je vlastně váženým průměrem přes dílčí plochy okna se zahrnutím vlivu tepelné vazby v uložení zasklení do rámu. Pokud jsou v dvojskle či trojskle umístěny "ozdobné" meziskelní příčky, pak se při výpočtu součinitele prostupu tepla jejich nepříznivý vliv rovněž uvažuje. Podívejme se trochu více na jednotlivé veličiny ve vztahu (28).

Součinitel prostupu tepla zasklení U_g obvykle uvádí jeho výrobce. Je ho možné také spočítat s pomocí ČSN EN 673.

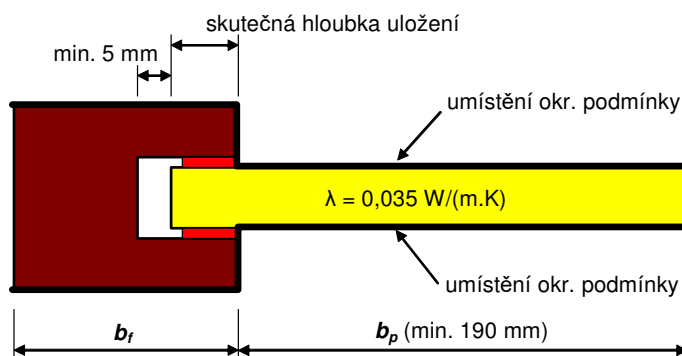
Součinitel prostupu tepla rámu U_f lze v orientačních výpočtech převzít z Tab. 4 a nebo lépe od výrobce. Lze jej také spočítat s pomocí numerického řešení dvourozměrného teplotního pole podle ČSN EN ISO 10077-2. Okenní rám se pro tyto účely modeluje co nejpřesněji podle skutečnosti,

¹⁷ Tepelná izolace je rozdělena na dvě vrstvy – jedna je umístěna pod hydroizolací a druhá nad ní.

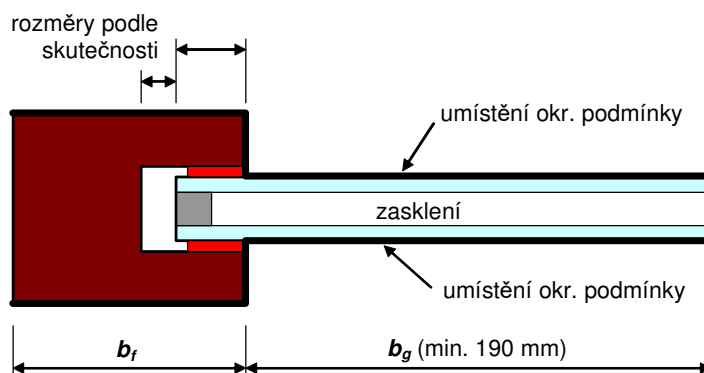
a to včetně všech vzduchových dutin, jejichž tepelnou vodivost je nutné stanovit výpočtem podle ČSN EN ISO 10077-2.

Tab. 3: Orientační parametry rámu a uložení zasklení do rámu

Typ rámu	Specifikace	Souč. prostupu tepla rámu U_f [W/(m ² .K)]	Lin. činitel prostupu tepla ψ_g [W/(m.K)]			
			Běžné zasklení		Zasklení s pokovením	
			kovové rámečky	plastové rámečky	kovové rámečky	plastové rámečky
dřevěný	měkké dřevo tl. 60 mm	2,0	0,06	0,05	0,08	0,06
	měkké dřevo tl. 80 mm	1,7				
	m. dřevo s PU příložkou	0,7 ÷ 0,9				
	tvrdé dřevo tl. 60 mm	2,3				
	tvrdé dřevo tl. 80 mm	2,0				
plastový	PVC dvoukomorový	2,2	0,06	0,05	0,08	0,06
	PVC tříkomorový	2,0				
	PVC pětikomorový	1,2 ÷ 1,3				
	Dtto s PU vyplněním	0,7 ÷ 0,9				
Kovový	bez přerušení mostů	nutné určit individuálně	0,02	0,01	0,05	0,04
	s přerušením mostů		0,08	0,06	0,11	0,08



Obr. 11 Schéma rámu s izolačním panelem



Obr. 12 Schéma rámu okna se zasklením

Specificky se v tomto výpočtu postupuje v případě zasklení – místo něj se zadává náhradní

tepelně izolační panel o tepelné vodivosti max. 0,035 W/(m.K). Tento panel musí mít stejnou tloušťku jako zasklení a musí být v rámu upevněn stejným způsobem. Schéma požadované úpravy rámu okna s dalšími doplňkovými geometrickými pravidly je uvedeno na Obr. 11.

Po výpočtu teplotního pole v upraveném detailu okenního rámu se součinitel prostupu tepla rámu určí ze vztahu

$$U_f = \frac{L_f - U_p \cdot b_p}{b_f}, \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (29)$$

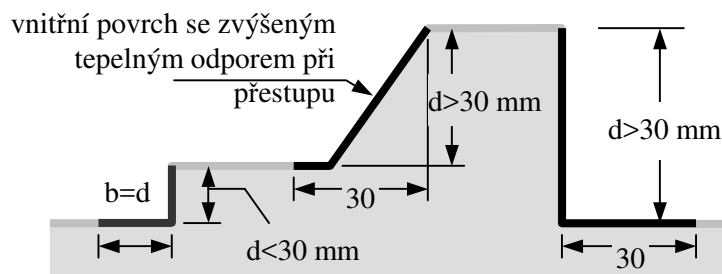
kde L_f je vypočtená tepelná propustnost rámem okna¹⁸ ve W/(m.K), U_p je součinitel prostupu tepla izolačního panelu ve W/(m².K) a b_p a b_f jsou viditelné šířky panelu a rámu okna v m (Obr. 11).

Lineární činitel prostupu tepla v uložení zasklení do rámu ψ_g se hodnotí pro styk rámu okna a skutečného zasklení včetně distančního rámečku v zasklení. Geometrie styku rámu a zasklení se volí v souladu s Obr. 12. Po výpočtu teplotního pole v detailu okenního rámu se zasklením lze lineární činitel prostupu tepla v uložení zasklení stanovit ze vztahu

$$\psi_g = L_g - U_f \cdot b_f - U_g \cdot b_g, \quad [\text{W}/(\text{m.K})] \quad (30)$$

kde L_g je vypočtená tepelná propustnost výsekem rámu se zasklením ve W/(m.K), U_f je součinitel prostupu tepla rámu ve W/(m².K) stanovený ze vztahu (29), U_g je součinitel prostupu tepla zasklení ve W/(m².K) použitý při výpočtu L_g a konečně b_f a b_g jsou šířky rámu a zasklení v m (Obr. 12).

Závěrem je nutné uvést ještě důležité upozornění týkající se **zadávaní okrajových podmínek**. Do výpočtů teplotních polí je třeba zadávat vždy jen tepelné odpory při přestupu tepla předepsané pro výpočet tepelných toků (viz Tab. 2). Standardně se tedy zadává hodnota 0,13 m².K/W pro vnitřní povrch a hodnota 0,04 m².K/W pro vnější povrch. V některých místech vnitřního povrchu se navíc tepelný odpor při přestupu uvažuje zvýšenou hodnotou 0,20 m².K/W vzhledem ke sníženému přestupu tepla prouděním (Obr. 13).



Obr. 13 Povrchy rámu se zvýšeným tepelným odporem R_s

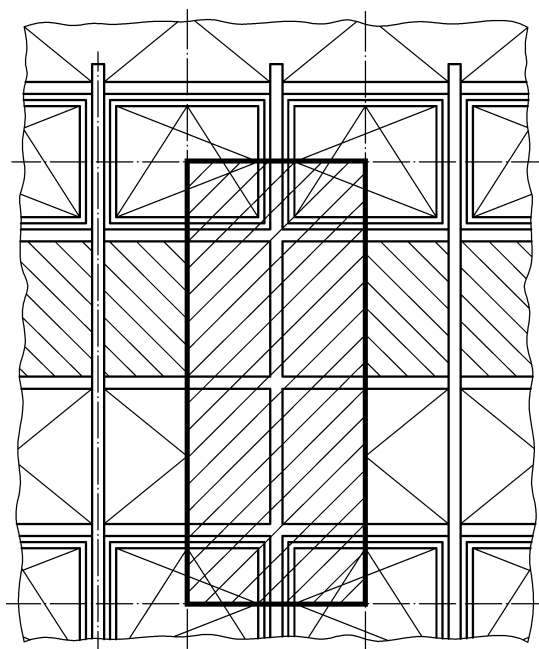
Chyby se také často dělají při výpočtu lineárního činitele prostupu tepla ψ_g . Zde je třeba dát pozor především na to, aby byly stejné součinitele prostupu tepla zasklení a rámu použity jak ve vztahu (30), tak při určení tepelné propustnosti L_g výpočtem teplotního pole.

1.2.3. Lehké obvodové pláště

Postup výpočtu součinitele prostupu tepla lehkých obvodových plášťů (dále LOP) je uveden v ČSN EN ISO 12631. Definovány jsou dvě základní metody výpočtu: **metoda celkového hodnocení**, která pracuje s ekvivalentními součiniteli prostupu tepla tepelných vazeb, a **metoda hodnocení po částech**, která je analogií výpočtu součinitele prostupu tepla okenních konstrukcí (viz 1.2.2). Vzhledem k omezenému rozsahu skript se podrobněji podíváme jen na metodu celkového hodnocení, která je jednodušší, pro praktické použití většinou výhodnější a přitom má nejširší

¹⁸ Výsledek řešení dvourozměrného teplotního pole – jde vlastně o tepelnou ztrátu hodnoceným detailem vztaženou na působící teplotní rozdíl.

rozsah použití. Další výpočetní postupy najde laskavý čtenář v citované normě.

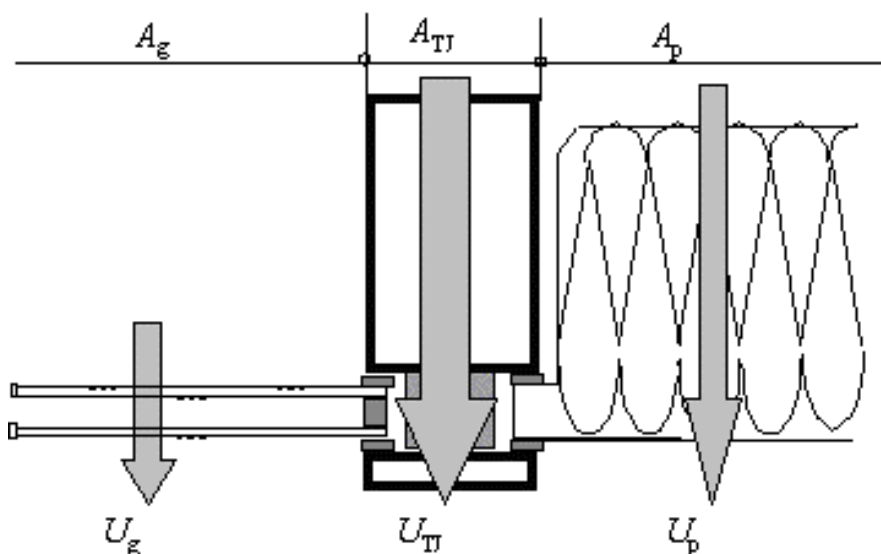


Obr. 14 Charakteristický výsek LOP

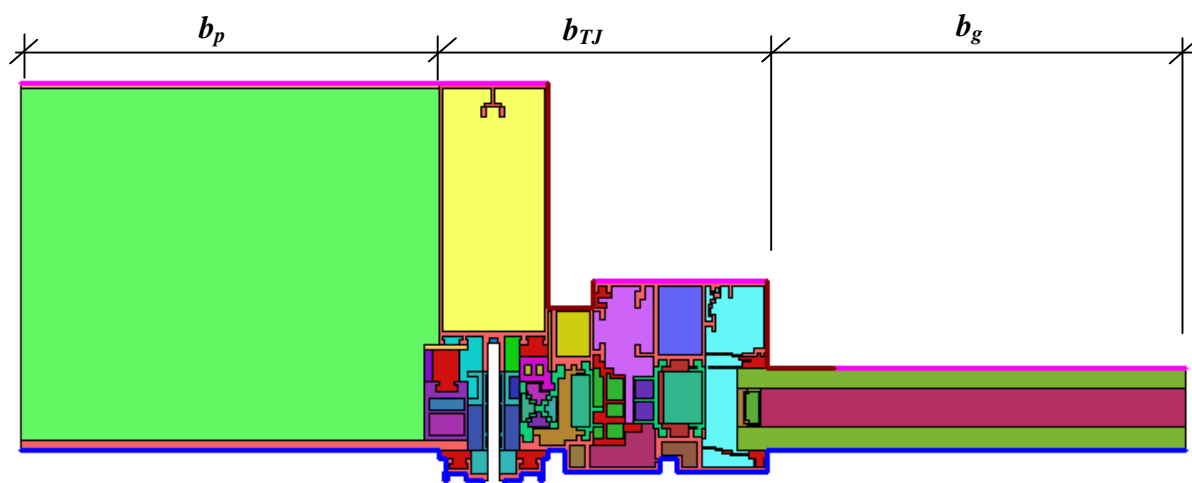
Součinitel prostupu tepla LOP se zásadně stanovuje pro charakteristický výsek LOP (Obr. 14). V metodě celkového hodnocení se používá vztah

$$U_{CW} = \frac{\sum A_g U_g + \sum A_p U_p + \sum A_{TJ} U_{TJ}}{\sum A_g + \sum A_p + \sum A_{TJ}}, \quad [W/(m^2.K)] \quad (31)$$

kde A_g , A_p a A_{TJ} jsou pohledové plochy zasklení, plné výplně a tepelné vazby v charakteristickém výseku LOP v m^2 (Obr. 15) a U_g , U_p a U_{TJ} jsou příslušné součinitele prostupu tepla zasklení, plné výplně a tepelné vazby ve $W/(m^2.K)$. Pokud je plocha zasklení různá při pohledu z interiéru a z exteriéru, uvažuje se ve výpočtu vždy plocha menší. U plochy tepelných vazeb je tomu naopak.



Obr. 15 Definice dílčích ploch a součinitelů prostupu tepla LOP



Obr. 16 Model tepelné vazby LOP zadáný do výpočtu tepelné propustnosti L_{TJ}

Vztah (31) je opět váženým průměrem součinitelů prostupu tepla provedeným přes dílčí plochy LOP. Vliv tepelných vazeb v místě uložení zasklení nebo plné výplně nebo okna do sloupku/příčnicku se projeví v hodnotě **součinitele prostupu tepla tepelné vazby U_{TJ}** . Do této veličiny se tedy promítnou jak tepelné vlastnosti samotného profilu LOP (sloupku/příčnicku), tak způsob uložení zasklení/plné výplně/okna a často i další vlivy (např. vliv distančního rámečku v zasklení). Součinitel prostupu tepla tepelné vazby proto nelze přímo srovnávat s požadavky ČSN 730540-2 na součinitel prostupu tepla rámu (sloupků/příčníků) LOP¹⁹. Z definičního vztahu pro U_{TJ} jsou zřejmé všechny souvislosti:

$$U_{TJ} = \frac{L_{TJ} - b_g U_g - b_p U_p}{b_{TJ}}, \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (32)$$

kde L_{TJ} je vypočtená tepelná propustnost celou tepelnou vazbou, tj. stykem profilu LOP a zasklení/plné výplně/okna ve $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, U_g a U_p jsou součinitele prostupu tepla zasklení a plné výplně ve $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, b_g a b_p jsou viditelné šířky zasklení a plné výplně v m a konečně b_{TJ} je viditelná šířka tepelné vazby (většinou šířka profilu LOP). Výpočet **tepelné propustnosti L_{TJ}** se provádí numericky řešením dvourozměrného teplotního pole podle stejných pravidel jako u okenních konstrukcí. Pozornost je třeba věnovat především okrajovým podmínkám a modelování vzduchových dutin (viz 1.2.2). Do výpočtu se zásadně zadává celá tepelná vazba tak, jak skutečně vypadá (Obr. 16).

Zbylé součinitele prostupu tepla ve vztahu (31) – tedy součinitel prostupu tepla zasklení a součinitel prostupu tepla plné výplně – se stanoví standardním způsobem. U zasklení jde tedy obvykle o údaj od výrobce, případně o vypočtenou hodnotu podle ČSN EN 673, u plné výplně se součinitel prostupu tepla stanovuje výpočtem podle ČSN EN ISO 6946.

Závěrem zbývá zmínit se o jednom specifickém problému LOP: o **vlivu spojovacích šroubů**. Zahrnout jej lze buď orientačně pro běžné případy²⁰ jako

$$U_{TJ} = U_{TJ,0} + 0,3 \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (33)$$

kde $U_{TJ,0}$ je součinitel prostupu tepla tepelné vazby bez vlivu spojovacích šroubů ve $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, nebo přesněji přímo do výpočtu teplotního pole. V takové případě se skutečné, bodové spojovací prostředky nahradí „průběžným“ šroubem o součiniteli prostupu tepla

¹⁹ Srovnávat s požadavky lze jen součinitel prostupu tepla profilu LOP, který se určuje postupem podle ČSN EN ISO 10077-2, tj. stejně jako u rámu okenních konstrukcí (viz vztah (29)).

²⁰ Vztah (33) platí pro spojovací šrouby v korozivzdorné oceli s průměrem do 6 mm vzdálené od sebe 200 až 300 mm.

$$\lambda_{s,eq} = \frac{\pi \cdot d_s}{4 \cdot l_s} \cdot (\lambda_s - \lambda_{r,eq}) + \lambda_{r,eq} \quad [W/(m.K)] \quad (34)$$

kde d_s je průměr skutečného šroubu v m, l_s je osová vzdálenost mezi šrouby v m, λ_s je tepelná vodivost šroubu ve W/(m.K) a $\lambda_{r,eq}$ je ekvivalentní tepelná vodivost materiálů nahrazených šroubem ve W/(m.K), která se určí jako

$$\lambda_{r,eq} = \frac{\sum d_i}{\sum R_i} \quad [W/(m.K)] \quad (35)$$

kde d_i je tloušťka i-tého materiálu nahrazovaného šroubem v m (ve směru osy šroubu) a R_i je tepelný odpor i-tého materiálu nahrazovaného šroubem v m²K/W (ve směru osy šroubu). Výsledný „průběžný“ šroub je vidět na Obr. 16 v profilu sloupku bíle.

1.3. Příklady

1.3.1. Konstrukce se systematickými tepelnými mosty

Prvním příkladem výpočtu součinitele prostupu tepla je konstrukce se systematickými tepelnými mosty umístěná v prostředí o převažující návrhové vnitřní teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 70%. Návrhová venkovní teplota je –15 °C. Konstrukce má skladbu (od interiéru):

- sádkarton tl. 12,5 mm
- PE folie tl. 0,1 mm
- minerální vlákna tl. 80 mm mezi dřevěnými sloupky 50/80 mm ve vzdálenostech 400 mm
- zdivo CP 450 mm.

Požadovaný součinitel prostupu tepla je nutné stanovit jak z Tab. 1, tak ze vztahu (3):

$$U_{w,N} = \frac{0,6 \cdot (\theta_{ai} - \theta_w)}{R_{si} \cdot (\theta_{ai} - \theta_e)} = \frac{0,6 \cdot (20,6 - 15,3)}{0,25 \cdot (20,6 + 15)} = 0,36 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}.$$

Z Tab. 1 vychází $U_N = 0,30 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ – tato hodnota je tedy požadovaným součinitelem prostupu.

Typ konstrukce: Stěna (tepelný tok vodorovně)

Korekce souč. prostupu tepla na vliv systematických tep. mostů DeltaU: 0,096 W/m²K

☐ při výpočtu uvažovat redistribuci vlhkosti

Z této položky lze vyvolat výpočet vlivu mostů klávesou F2

Základní parametry konstrukce | Doplnující parametry

Skladba konstrukce (od interiéru):

Vrstva	Název	D [m]	Lambda	M.teplo	M.hmotnost	Faktor Mi
1	Sádkarton	0,0125	0,220	1060,0	750,0	9,0
2	PE folie	0,0001	0,350	1470,0	900,0	70000,0
3	Min. vlákna	0,0800	0,040	1150,0	75,0	1,1
4	Zdivo CP	0,4500	0,860	900,0	1800,0	9,0
5						

50% z deklarované hodnoty vzhledem ke spojům

Obr. 17 Skladba konstrukce zadaná do programu Teplo

Výpočet součinitele prostupu tepla konstrukce bude proveden přibližným způsobem s pomocí programu Teplo starší verze²¹. Vstupní data zadávaná do tohoto programu ukazují Obr. 17 a Obr. 18. Výsledný součinitel prostupu tepla stanovený programem včetně vlivu tepelných mostů činí

²¹ Tento text původně vznikl jako skript pro již neexistující předmět SF31 v roce 2004. Pro vytvoření příkladu byla použita tehdy aktuální verze programu.

$U = 0,46 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Tato hodnota je vyšší než $U_N = 0,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ - požadavek ČSN 730540-2 na součinitel prostupu tepla konstrukce tedy není splněn.

Zajímavé je srovnání korektní hodnoty součinitele prostupu tepla s hodnotou stanovenou bez vlivu tepelných mostů. Pokud bychom tepelné mosty zanedbali, vyšel by součinitel prostupu tepla $0,36 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ - byl by tedy o 22 % nižší. Tak vysoké je v tomto konkrétním případě zhoršení ideální hodnoty součinitele prostupu tepla vlivem tepelných mostů (a samozřejmě také chyba v hodnocení, pokud se s tepelnými mosty nepočítá).

Výpočet korekce DeltaU

Doplněním údajů do jedné či více záložek níže zahrnete příslušný vliv do výpočtu...

Korekce na systematické tepelné mosty, | na netěsnosti v tepelných izolacích, | na kotevní prvky | Poznámky |

Počet výšek konstrukce kolmých na tepelný tok, v nichž lze uvažovat 1D vedení tepla (max. 4): **2**

Směr tepelného toku →

výšek s převládající základní skladbou

1. výšek tvoří **87,50** % z celk. plochy kce

2. výšek tvoří **12,50** % z celk. plochy kce

Skladby ve směru tep. toku:

Skladba kce ve výseku č. 1

Skladba kce ve výseku č. 2

Zadání skladby konstrukce ve výseku č. 1

Na tomto okénku lze zadat skladbu ve směru tepelného toku, a to pro výsek č. 1.

Skladba konstrukce od interiéru:

Č.	Název	D [m]	Lambda
☒ 1	Sádrokarton	0,0125	0,220
☒ 2	PE folie	0,0001	0,350
☒ 3	Min. vlákna	0,0800	0,040
☒ 4	Zdivo CP	0,4500	0,860

Zadání skladby konstrukce ve výseku č. 2

Na tomto okénku lze zadat skladbu ve směru tepelného toku, a to pro výsek č. 2.

Skladba konstrukce od interiéru:

Č.	Název	D [m]	Lambda
☒ 1	Sádrokarton	0,0125	0,220
☒ 2	PE folie	0,0001	0,350
☒ 3	Dřevo	0,0800	0,220
☒ 4	Zdivo CP	0,4500	0,860

Uložit data

Načíst data

Odpor při přestupu tepla na vnitřní straně Rsi: **0,13** m²K/W

Odpor při přestupu tepla na vnější straně Rse: **0,04** m²K/W

Vypočtená korekce na tepelné mosty

Korekce na tep.mosty: **0,096** W/m²K

Korekce na netěsnosti: **0,000** W/m²K

Korekce na kotvy: **0,000** W/m²K

Celková korekce: 0,096 W/m²K

Vypočítat

Protokol o výpočtu

OK (použít)

Storno

Obr. 18 Pomocný výpočet vlivu tepelných mostů v programu Teplo

Pokud bychom pro zajímavost zadali charakteristický výsek konstrukce do programu Area, stanovili teplotní pole a určili tepelnou propustnost $L = 0,189 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, vyšel by s použitím přesného vztahu (9) součinitel prostupu tepla $U = 0,47 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ – hodnota tedy velmi blízká výše uvedenému výsledku přibližného výpočtu.

1.3.2. Podlaha na zemině

Dalším příkladem výpočtu součinitele prostupu tepla je podlaha osaměle stojící nepodsklepené průmyslové haly. Hala má vnější půdorysné rozměry 20 x 10 m. Převládající vnitřní návrhová teplota je 15 °C a relativní vlhkost 50%. Návrhová venkovní teplota je -18 °C. Podlaha má skladbu (shora):

- betonová mazanina vyztužená s povrchovou úpravou tl. 150 mm
- lepenka A 500
- pěnový polystyren tl. 50 mm
- hydroizolace na podkladním betonu.

Požadovaná hodnota součinitele prostupu tepla se v tomto případě počítá ze vztahu (2) a vychází jako $U_N = 0,45 \cdot (16 / (15 - 4)) = 0,65 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Součinitel prostupu tepla podlahy stanovíme nejprve **bez vlivu zeminy** ze vztahu (6) jako $U = (0,17 + (0,15/1,7 + 0,05/0,044))^{-1} = 0,71 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$. Vypočtená hodnota tedy nesplňuje požadavek ČSN 730540-2.

Podívejme se ještě na výpočet součinitele prostupu tepla podlahy **s vlivem zeminy**. Charakteristický rozměr podlahy je podle vztahu (20) $B = 200/30 = 6,67 \text{ m}$, ekvivalentní tloušťka pak podle vztahu (19) $d_t = 0,15 + 2 \cdot (0,17 + 1,22 + 0,04) = 3,01 \text{ m}$ (za předpokladu tloušťky stěn 150 mm). Vzhledem k tomu, že je $d_t < B$, použijeme vztah

$$U = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot B' + d_t} \cdot \ln\left(\frac{\pi \cdot B'}{d_t} + 1\right) = \frac{2 \cdot 2}{3,14 \cdot 6,67 + 3,01} \cdot \ln\left(\frac{3,14 \cdot 6,67}{3,01} + 1\right) = 0,35 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Vypočtený součinitel prostupu tepla s vlivem zeminy je o 51 % nižší než součinitel prostupu tepla bez započítání vlivu podloží. Jak je vidět, rozdíly mezi oběma hodnotami mohou být dosti značné, a proto je třeba každou z nich používat v souladu s jejím účelem (viz kapitola 1.2.1.4).

Zbývá zjistit, jak by dopadla hodnocená podlaha podle alternativního požadavku (5). Podle něj by byla vyhovující, pokud by platilo $H_g \cdot (\theta_{im} - \theta_e) \leq A \cdot U_N \cdot (\theta_{im} - 5)$. Po dosazení do nerovnice dostáváme $200 \cdot 0,35 \cdot (15 + 18) \leq 200 \cdot 0,65 \cdot (15 - 5)$, tj. $2310 \leq 1300$. Je zřejmé, že nerovnice neplatí a podlaha tudíž nesplňuje ani alternativní požadavek ČSN 730540-2 podle vztahu (5).

1.3.3. Okenní konstrukce

Posledním příkladem je přesné stanovení součinitele prostupu tepla jednoduché okenní konstrukce uvedené na Obr. 19. Výpočet byl proveden s pomocí řešení dvourozměrného teplotního pole v místě rámu programem Area.

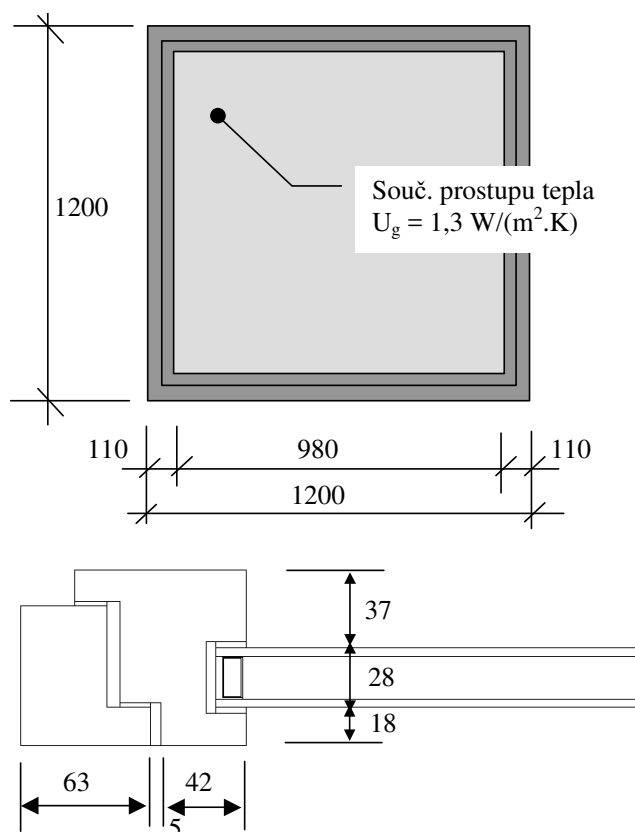
Nejprve bylo nutné zadat do programu rám okna podle Obr. 19, dvojsklo nahradit izolačním panelem a zadat správně okrajové podmínky (viz kapitola 1.2.2). Z výpočtu vyšla tepelná propustnost $L_f = 0,346 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$. **Součinitel prostupu tepla rámu** pak bylo možné stanovit ze vztahu (29): $U_f = (0,346 - 1,03 \cdot 0,19)/0,11 = 1,4 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$.

Dalším krokem byl výpočet **lineárního činitele prostupu tepla v uložení zasklení**. Do programu Area byl zadán rám včetně dvojskla a jeho hliníkového distančního rámečku podle Obr. 19. Tepelná vodivost výplně mezi skly ve dvojskle byla dopočítána tak, aby výsledný součinitel prostupu tepla dvojskla skutečně odpovídal hodnotě $1,3 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$. Výpočtem teplotního pole byla stanovena tepelná propustnost $L_g = 0,490 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$. Lineární činitel prostupu tepla v uložení zasklení byl pak stanoven s pomocí vztahu (30): $\psi_g = 0,490 - 1,4 \cdot 0,11 - 1,3 \cdot 0,19 = 0,09 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$.

Zbývá vypočítat výsledný **součinitel prostupu tepla okna** ze vztahu (28):

$$U_w = (0,9604 \cdot 1,3 + 0,4796 \cdot 1,4 + 3,92 \cdot 0,09)/1,44 = 1,58 = 1,60 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Okenní konstrukce nesplní požadavek ČSN 730540-2 na součinitel prostupu tepla, protože vypočtená hodnota součinitele prostupu je vyšší než hodnota $1,5 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ požadovaná pro nová okna.



Obr. 19 Jednoduché dřevěné okno a jeho rám

Pro zajímavost ještě uvedme, jak by se změnil součinitel prostupu tepla okna, pokud bychom ho vypočítali s pomocí tabulkových hodnot z ČSN EN ISO 10077-1. Součinitel prostupu tepla rámu by byl podle tabulek $U_f = 1,5 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$, lineární činitel prostupu tepla $\psi_g = 0,08 \text{ W/(m.K)}$ a součinitel prostupu tepla okna $U_w = 1,60 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ – byl by tedy v tomto případě shodný jako při přesném výpočtu. Za povšimnutí ovšem stojí skutečnost, že zatímco tabulková hodnota součinitele prostupu tepla rámu je na straně bezpečnosti, s tabulkovou hodnotou lineárního činitele prostupu tepla už tomu tak není. Tabulkové hodnoty ψ_g byly sice nedávno v rámci revize EN ISO 10077-1 zvyšovány, nicméně ani toto zvýšení nemusí být evidentně ve všech případech dostatečné.