Výpočet typických tepelných mostů a jejich minimalizace – 250 detailů

ing. Roman Šubrt a kolektiv

„Publikace je určena pro poradenskou činnost a je zpracována v rámci Státního programu na podporu úspor energie a využití obnovitelných zdrojů energie pro rok 2007– část A – PROGRAM EFEKT".

Publikace obsahuje výpočet cca 250 detailů s vyčíslením lineárních činitelů prostupu tepla ψ [W/K] a s teplotním faktorem f_{Rsi} a dále hodnot χ [W] pro bodový činitel prostupu tepla.

Publikace je určena energetickým auditorům, projektantům, stavebním firmám i laikům, kteří se o danou problematiku zajímají.

Přínosem publikace je především to, že se jedná o ucelený soubor většiny typických detailů, které se na obvykle na stavbě nacházejí. Řešení jednotlivých detailů bylo konzultováno s prováděcími firmami, takže jde o detaily, které lze na stavbě na rozdíl od mnoha „vzorových" detailů realizovat.

Zpracovatel:	Energy Consulting – Project, s.r.o., Přemyšlenská 484/28, 182 00 Praha 8
IČ:	26113317
Kontaktní osoba:	Ing. Martin Škopek, Ph.D.
e-mail:	info@e-c.cz
web:	www.e-c.cz; www.tepelnymost.cz
datum:	říjen 2007

OBSAH

1 úvodní slovo 3
1.1 Důležité upozornění 4
1.2 „Definice" tepelného mostu 4
1.3 Výpočet tepelné ztráty objektu 6
1.4 Požadavky ČSN 7
1.5 Vlastnosti materiálů a anizotropie 9
1.6 Tepelný odpor vzduchové dutiny 11
1.7 Odpor při přestupu tepla 12
1.8 Infrakamera 12
2 požadavky normy ČSN 73 0540-2 na tepelné izolace 14
2.1 Nejnižší vnitřní povrchová teplota konstrukce θ_{ai} 15
2.2 Maximální součinitel prostupu tepla U 17
2.3 Maximální lineární činitel prostupu tepla ψ_k 19
2.4 Maximální bodový činitel prostupu tepla χ_j 20
2.5 Maximální součinitel spárové průvzdušnosti i_{LV} 20
2.6 Maximální průměrný součinitel prostupu tepla U_{em} 21
2.7 Maximální pokles dotykové teploty podlahy $\Delta\theta_{10}$ 22
2.8 Maximální zkondenzované množství vodní páry v konstrukci G_k 23
2.9 Tepelná stabilita místnosti v letním období $\Delta\theta_{ai,max}$ 24
2.10 Maximální intenzita výměny vzduchu v místnosti (doporučeno) n_{50} 25
3 kondenzace vodní páry v konstrukci 27
4 výpočet typových tepelných mostů s vyčíslením lineárních činitelů prostupu tepla ψ_k a teplot. faktoru vnitřního povrchu $\Delta f_{Rsi,cr}$ 29
5 výpočet typových tepelných mostů s vyčíslením bodových činitelů prostupu tepla χ 501
6 použitá a související literatura 517

1 úvodní slovo

Vážení čtenáři, opět přicházíme s evergreenem, kterým jsou tepelné mosty. Tato publikace navazuje na předchozí, kdy první byla vydána nakladatelstvím GRADA, druhá pak vznikla za podpory ČEA v roce 2003.

Tato publikace je opět vytvořena za podpory Státního programu na podporu úspor energie a využití obnovitelných zdrojů energie pro rok 2007– část A – PROGRAM EFEKT a je reakcí i na ohlasy, které dostáváme na předchozí publikace.

Vzhledem k tomu, že se jedná o volné pokračování předešlého, rádi bychom zde upozornili na několik odlišností a novinek, které nastaly.

V prvé řadě je nutné říci, že lineární tepelné mosty jsou již pomalu chápány i laickou veřejností. Zde nastává otevřené pole působnosti jednak ve vytvoření webového (či jiného) katalogu tepelných mostů s jejich kvantifikací. My se o to pokusíme na stránkách www.tepelnymost.cz.

Druhé konstatování, které vyplývá z předešlého je, že si pomalu začínáme uvědomovat i význam bodových tepelných mostů, které jsou zatím velmi podceňovány. Při jejich hodnocení jsme dospěli k závěru, že mohou mít často výrazně větší vliv, než tepelné mosty lineární, právě proto, že jsou považovány za nepodstatné a že jsou velmi často opakující se ve velkém množství (hmoždinky na fasádě, kotvy zatepovacího systému, kotvy některých sendvičových konstrukcí…). Jak z jednoho níže uvedeného detailu vyplývá, může mít bodový tepelný most zásadní vliv na tepelnou izolaci, V námi počítaném případě je to nárůst spotřeby tepla na vytápění až o 20%, přitom v uvedeném detailu předpokládáme dokonalé provedení konstrukce. Pokud bychom uvažovali s reálným stavem tak, jak se s ním na stavbách setkáváme, byl by pravděpodobně vliv těchto bodových tepelných mostů osciloval někde okolo snížení tepelně izolačních vlastností konstrukcí o 50 %.

1.1 Důležité upozornění

Rádi bychom zde vypíchli upozornění na to, že na hodnocení tepelného mostu má podstatný vliv jeho přesná geometrie a dále přesné zadání podmínek a hodnot do výpočtu zadaných. Zde se jedná vedle tepelné vodivosti jednotlivých materiálů, které jsou podstatné hlavně tam, kde lze očekávat jejich zvýšenou vlhkost (třeba pro jejich velkou nasákavost) zejména o okrajové podmínky, tedy o Tepelné odpory při přestupu.

Pokud se jednotlivé detaily jakkoliv porovnávají, je nutné nejprve zjistit všechny parametry ovlivňující výpočet.

1.2 „Definice" tepelného mostu

Tepelný most je místo v konstrukci, kde dochází k větším tepelným tokům než v bezprostředním okolí tohoto místa. Jde tedy o místa, kudy uniká na jednotku plochy mnohem více tepelné energie než okolní konstrukcí při stejné ploše. Tepelné mosty mohou být **systémové**, **nahodilé** a nebo se může jednat o **tepelné vazby**. V praxi se tepelné mosty projevují chladnějším místem v interiéru a nebo naopak teplejším místem v exteriéru, pokud je pochopitelně interiér teplejší než exteriér.

Systémové tepelné mosty jsou ty, které se neustále pravidelně opakují a jejichž vliv musí být při výpočtech vždy zahrnut již do součinitele prostupu tepla konstrukcí. Jde například o krokve, mezi kterými je tepelná izolace v podkroví, o maltové lože u zděných staveb nebo o různé příčky u tepelně izolačních tvarovek, které jsou určeny pro prolití betonem. V Rakousku například vliv tepelných mostů krokvemi zahrnují do výpočtů tak, že součinitel tepelné vodivosti minerální vlny tvořící tepelnou izolaci mezi krokvemi zvýší z λ = 0,04 W/(m.K) na λ = 0,05 W/(m.K). Vliv maltového lože na součinitel přestupu tepla je jistě všem známý a jasný. Proto je velmi důležité při stavbě domu kontrolovat, zda dodavatel skutečně

provádí stavbu na tepelně izolační maltu tak, jak obvykle předepisuje stavební projekt, nebo zda šetří a používá ke zdění normální maltu.

Nahodilé tepelné mosty jsou takové, které se v konstrukci pravidelně neopakují. Ty je nutné do výpočtu zahrnout buď zvýšením součinitele prostupu tepla (dříve se zvyšoval součinitel prostupu tepla o 10%, nyní je vhodnější volit přirážku ΔU = 0,1 až 0,25 W/(m^2.K), u velmi dobře provedených staveb je naopak možné jít na hodnoty 0,02 až 0,05 W/(m^2.K)) a nebo je nutné jej do výpočtu zahrnout přesně spočítáním lineárního součinitele prostupu tepla ψ a jeho vynásobením příslušnou délkou tepelného mostu. Mimo lineárních tepelných mostů mohou být ještě tepelné mosty bodové. Ty se pak započítávají připočítáním bodového součinitele prostupu tepla χ vynásobeného počtem prvků v konstrukci.

Mezi nahodilé tepelné mosty je možné počítat různé ztužující věnce a jiné nosné konstrukce, různé niky pro měření plynu či elektřiny, niky pro suchovody i hydranty, průchody konstrukcemi, kdy jimi prochází tepelně vodivý materiál, jako nosné ocelové tyčové prvky, trubky, průchodky, kotvy atd.

Tepelnými vazbami jsou myšleny styky dvou různých konstrukcí. Nejde tedy o klasický tepelný most, kdy je tepelná izolace zeslabena či přerušena jinou konstrukcí, ale kde dochází ke zvýšenému tepelnému toku díky styku dvou a více různých konstrukcí, jako je například napojení stropní konstrukce na obvodovou stěnu, napojení stěny na okno, napojení stěny na základy apod.

Tepelné mosty je pochopitelně možné rozdělit podle mnoha hledisek na různé skupiny, například na tepelné mosty:

- stavební (napojení dvou konstrukcí, např. základ a stěna, stěna a okno či dveře, prostup potrubí);
- geometrické (geometrické změny konstrukce, např. roh stěn, uskočení);

- systematické (v konstrukci se opakují místa s horšími tepelně izolačními vlastnostmi, např. spony, krokve mezi izolací ve střeše, maltové lože mezi cihlami);
- konvektivní (kde může docházet k přenosu energie přes tepelnou izolaci prouděním, např. v netěsných střešních konstrukcích).

1.3 Výpočet tepelné ztráty objektu

Výpočet tepelné ztráty se děje podle ČSN EN ISO 13 789 a ČSN EN 832. Zde je definována potřeba tepla na pokrytí tepelné ztráty takto:

$Q_l = H.(\theta_i - \theta_e).t$

kde $H = H_T + H_V$

přičemž platí, že: $H_T = L_D + L_S + H_U$

$L_D = \Sigma_j A_j U_j + \Sigma_k l_k \psi_k + \Sigma_j \chi_j$

Z uvedeného vztahu je patrné, že při významných tepelných mostech a současně dobře izolovaných plošných konstrukcích bude tvořit tepelná ztráta tepelnými mosty významnou položku v celkové tepelné ztrátě.

V těchto vztazích je:

A plocha prvku v m^2;

H měrný tepelný tok ve W/K;

H_T měrná ztráta prostupem tepla ve W/K;

H_U měrná ztráta prostupem tepla přes nevytápěné prostory ve W/K;

H_V měrná tepelná ztráta větráním ve W/K;

l délka lineárního tepelného mostu v m;

L tepelná propustnost ve W/K;

L_D tepelná propustnost konstrukcemi mezi vytápěným a vnějším prostorem ve W/K;

L_S tepelná propustnost zeminou ve W/K;

U součinitel prostupu tepla ve W/(m^2.K) [dříve označovaný „k"];

ψ lineární činitel prostupu tepla ve W/(m.K);

χ bodový činitel prostupu tepla ve W/K;

θ_i požadovaná vnitřní teplota ve °C;

θ_e průměrná vnější teplota během časového úseku ve °C.

1.4 Požadavky ČSN

Pro posuzování tepelných izolací staveb platí ČSN 73 0540-2, kde jsou stanoveny minimální či maximální hodnoty jednotlivých parametrů. V této normě je 9 závazných požadavků na stavbu a 1 doporučený:

1. nejnižší vnitřní povrchová teplota konstrukce θ_{ai}
2. maximální součinitel prostupu tepla pro různé druhy kosuntrukcí U
3. maximální lineární činitel prostupu tepla ψ_k
4. maximální bodový činitel prostupu tepla χ_j
5. součinitel spárové průvzdušnosti i_{LV}
6. průměrný součinitel prostupu tepla U_{em}
7. pokles dotykové teploty podlahy $\Delta\theta_{10}$
8. zkondenzované množství vodní páry v konstrukci G_k

9. tepelná stabilita místnosti v letním období $\Delta\theta_{ai,max}$

10. intenzita výměny vzduchu v místnosti (doporučeno) n_{50}

Z uvedeného se v této publikaci budeme zabývat body 3 a 4, tedy lineárním činitelem prostupu tepla ψ_k a bodovým činitelem prostupu tepla χ_j. Zde je ještě nutno uvést, proč se jedná o činitele prostupu tepla a nikoliv součinitele. Z fyzikálního hlediska nejde o žádný jev, který v daném místě nastává, pouze tímto korekčním činitelem zohledňujeme rozdíl mezi jednorozměrným vedením tepla a dvou či trojrozměrným vedením tepla v místě tepelného mostu, což je i vysvětlení, proč může být tento činitel v některých místech a v některých případech záporný.

Nyní k výpočtů pomocí lineárního činitele prostupu tepla:

Pro výpočet tepelné ztráty budovy se používají vnější rozměry budovy. Proto je nutné vždy zadávat vnější rozměry a k nim příslušné činitele prostupu tepla. Pokud však počítáme z vnitřních rozměrů (např. pokud počítáme jednotlivé místnosti), tak můžeme k danému problému přistupovat z fyzikálního hlediska dvěma způsoby. Buď budeme zadávat vnitřní rozměry konstrukcí a jím odpovídající činitele prostupu tepla (což je fyzikálně správnější), nebo můžeme použít vnější rozměry zvětšené o polovinu konstrukce a připočítat k nim příslušný podíl činitele prostupu tepla z exteriéru (POZOR! není možné počítat polovinu činitele prostupu tepla připadající na detail, který patří ke dvěma sousedním místnostem!). Osobně se přikláním k výpočtům z vnější strany. Pokud se z nějakého důvodu počítají tepelné ztráty z vnitřní strany, pak je asi vhodnější počítat s reálnými rozměry, tedy vnitřními, a tím pádem počítat i s činiteli z interiéru. Z těchto důvodů je u každého detailu uveden činitel prostupu tepla z exteriéru a dále pak z interiéru, pokud se z interiéru jedná o dvě prostory, je vždy uváděn horní činitel prostupu tepla z interiéru a dolní činitel prostupu tepla z interiéru, přičemž horní a dolní je bráno z pozice obrázku. Obdobně je to pak u vnitřních povrchových teplot respektive v této publikaci nejsou používány nejnižší

povrchové teploty, ale teplotní faktory. Teplotní faktor { f_{Rsi} = 1 - (θ_{ai} - θ_{si}) / (θ_{ai} - θ_e) } je bezrozměrné číslo a udává poměrnou teplotu na povrchu v interiéru. Po dosazení vnitřní a vnější teploty pak lze ze vztahu θ_{si} = θ_{ai} - (1 - f_{Rsi}) * (θ_{ai} - θ_e) vypočítat přesnou povrchovou teplotu.

1.5 Vlastnosti materiálů a anizotropie

Při matematickém řešení tepelných mostů je nutné vycházet ze součinitelů tepelné vodivosti, jejichž přesné stanovení je v mnoha případech problematické. Většina staveních materiálů má tyto vlastnosti změřeny a jsou uvedeny v příslušné normě. U nových materiálů, které v normě uvedeny nejsou si tuto vlastnost obvykle nechá změřit výrobce či dovozce, a pak ji deklaruje v certifikátu či jinde. Zatím nám není znám případ, že by byl nějaký materiál reklamován proto, že nesplňuje tepelně izolační vlastnosti uváděné výrobcem. To je pochopitelně dáno i tím, že prokázání daných vlastností je finančně velmi nákladné. Potíže s určením vlastností nastávají u neznámých materiálů (např. již dříve do stavby zabudovaných) a u materiálů, které mají velký rozptyl vlastností, nebo tam, kde je nutné postupovat s větší přesností.

Problémem také bývá, že součinitel tepelné vodivosti je uváděn za určitých vlhkostních podmínek. Pokud však je materiál vlhčí, jeho tepelně izolační vlastnosti se zhoršují. Zvýšená vlhkost materiálu pochopitelně hrozí právě v místech tepelných mostů a vazeb, kde kondenzace vodní páry jejich záporný vliv ještě zhoršuje.

S dalším problémem při řešení tepelných mostů je možno se setkat u anizotropních materiálů, tedy u těch materiálů, které nemají ve všech směrech stejné vlastnosti. Typickým příkladem je dřevo, u kterého je i v normě uveden jiný součinitel tepelné vodivosti pro směr kolmý k vláknům i pro směr rovnoběžný s vlákny. Mnoho lidí si však neuvědomuje, že stejným materiálem jsou i dutinové cihelné tvarovky, ať se již jedná o starší CDm (cihly děrované metrického

formátu), CD INA, CD IVA, ale i v současné době hojně používané tvarovky typu Therm. Proto jsme se tomuto problému v této publikaci věnovali, abychom zjistili praktický význam anizotropie některých materiálů na velikost tepelného mostu či tepelné vazby.

Při praktickém provádění výpočtů dvourozměrných teplotních polí se mimo odlišných vlastností stavebních materiálů od normových hodnot či hodnot udávaných výrobcem nebo dovozcem naráží i na další dva podstatné problémy, které ovlivňují míru přiblížení se skutečnosti. A tím je přesné stanovení ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti vzduchové mezery a dále pak stanovení okrajových podmínek, tedy zejména součinitele přestupu tepla mezi vzduchem a mezi konstrukcí.

Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti λ_{ev} je možné buď dopočítat, popřípadě odhadnout a výpočtem ověřit, pokud známe vlastnosti celé konstrukce obsahující vzduchovou vrstvu (může se například jednat o zjištění vlastností vzduchových dutin u cihelných tvarovek, u kterých známe celkový tepelný odpor), a nebo je nutné postupovat podle výpočtových postupů nebo empirických vztahů uvedených v normách.

Stanovení skutečného součinitele přestupu tepla je ještě problematičtější, neboť nezáleží pouze na umístění, tvaru a druhu konstrukce a celého objektu. Tento součinitel je velmi ovlivnitelný rozmístěním zdrojů tepla i rozmístěním nábytku a dalšího zařízení. Při měření infrakamerou jsme se například v praxi setkali s tím, že v některých místech byla konstrukce v interiéru výrazně chladnější než jinde. Přitom se jednalo o relativně homogenní konstrukci a nic nenasvědčovalo tomu, že by v inkriminovaném místě mohl být tepelný most či konstrukce výrazně horší kvality. Často se jednalo právě o takováto místa, kde bylo proudění vzduchu výrazně omezeno, tím došlo k nárůstu součinitele přestupu tepla h_{si} (dle starších českých norem je doposud používané označení α_i), a tudíž došlo ke snížení povrchové teploty konstrukce.

1.6 Tepelný odpor vzduchové dutiny

Pro stanovení tepelného odporu vzduchové dutiny je možné podle tvaru této dutiny vycházet ze dvou zdrojů. Oba jsou uvedeny v ČSN EN ISO 6946. Pro vzduchovou dutinu, kde dva z rozměrů výrazně převládají nad třetím rozměrem, je v této normě uvedena tabulka tepelného odporu nevětrané vzduchové dutiny. Obdobná tabulka je uvedena i v ČSN 73 0540-3.

Pro nevětrané vzduchové dutiny, kde jeden rozměr výrazně převažuje nad dalšími, je pak v ČSN EN ISO 6946 uveden výpočtový postup. Ten je dán vztahem:

$$R_g = {}^{1}/\{ h_a + 0{,}5\, E\, h_{ro} [1 + (1+d^2 / b^2)^{0,5} - d / b] \}$$

V tomto vztahu je:

R_g tepelný odpor vzduchové dutiny

d rozměr vzduchové dutiny rovnoběžný se směrem tepelného toku

b druhý malý rozměr

E součinitel vzájemného osálávání (u stejných materiálů je roven 1)

h_a součinitel přestupu tepla vedením (prouděním)

h_{ro} součinitel přestupu tepla sáláním černého tělesa

Tento přesnější výpočet je pak v ČSN EN ISO 10211-1 rozveden do tabulkové podoby, kde je možné na základě rozměrů dutiny odečíst ekvivalentní tepelnou vodivost.

1.7 Odpor při přestupu tepla

Odpor při přestupu tepla je možné buď stanovit výpočtem podle ČSN EN ISO 6946 a nebo je možné použít výpočtový postup uvedený v ČSN EN ISO 10211-1. Pro výpočet tepelných mostů je vhodnější použít tabulkových hodnot uvedených v této normě. Zde se doporučuje použít hodnoty R_{se} = 0,04 $m^2.K.W^{-1}$ pro přestup na vnější straně, R_{si} = 0,013 $m^2.K.W^{-1}$ pro přestup na vnitřní straně na okně, R_{si} = 0,25 $m^2.K.W^{-1}$ pro přestup na vnitřní straně v horní polovině místnosti a R_{si} = 0,35 $m^2.K.W^{-1}$ pro přestup na vnitřní straně v dolní polovině místnosti. ČSN 73 0540-3 z roku 2005 pak uvádí tyto hodnoty rozdílně, a to jak pro šíření tepla, tak i pro šíření vlhkosti, zásadní je, že pro šíření vlhkosti je max R_{si} = 0,25 $m^2.K.W^{-1}$, což je hodnota méně přísná, než v evropských normách.

1.8 Infrakamera

Tepelné mosty v konstrukci se projevují při vnější zimní teplotě a vytápění v interiéru chladnějším (v interiéru) či teplejším (v exteriéru) povrchem než je okolní konstrukce. To umožňuje vyšetřovat tepelné mosty infrakamerou, kdy lze získat okamžitě představu, kde, jak velká a jakého tvaru je teplotní anomálie na povrchu konstrukce. V této souvislosti je nutné upozornit na to, že používání infrakamery má svá přísná pravidla a výsledky měření, neprovedeného odborníkem – stavařem se specializací pro práci s tímto zařízením může vést k velkým omylům při měření. Při měření je totiž nutné nejen dobře odečíst teplotu z displeje, ale uvědomit si veškeré souvislosti, které toto měření má. Vlivů, které mohou ovlivnit měření, je skutečně mnoho. Patří sem kvalita povrchu a jeho emisivita, směrovost emisivity, povětrnostní podmínky jako oslunění, zvlhnutí, silný vítr a podobně, dále pak emisivita okolních povrchů, zdroje sálavého tepla, překážky zabraňující proudění vzduchu, tepelná kapacita jednotlivých materiálů a mnoho dalšího. Tyto vlivy je pochopitelně nutné do posuzování konstrukce zahrnout, i když není snaha o získání hodnot absolutních povrchových teplot, ale

stačí nám pouze relativní povrchové teploty vztažené k některému bodu na termogramu.

2 požadavky normy ČSN 73 0540-2 na tepelné izolace

Povinnost hodnocení stavebních konstrukcí z hlediska tepelně technických vlastností vyplývá ze Stavebního zákona a z vyhlášek o technických požadavcích na výstavbu, hygienických předpisů a dále ze Zákona o hospodaření energií 406/2000 Sb. v platném znění a prováděcích vyhlášek k tomuto zákonu. Zde je striktně dán požadavek na kvalitu tepelných izolací staveb, výjimku tvoří pouze ty stavby, kde Energetický audit prokáže nemožnost tyto požadavky splnit. (Toto se týká např. historických budov apod.) Má se za to, že požadavky na budovy jsou splněny, pokud jsou dodrženy podmínky normy ČSN 73 0540. Zde je nutné upozornit i na to, že podle posledního znění Zákona o hospodaření energií bude nutné všechny v zákoně definované budovy hodnotit komplexně ve vztahu k nárokům na energie, tedy nejen ve vztahu k nárokům na potřebu energie na vytápění, toto však není a ani nemůže být předmětem této příručky.

Poslední platné znění normy ČSN 73 0540-2 z roku 2007 obsahuje tyto požadavky:

1. nejnižší vnitřní povrchová teplota f_{Rsi}
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 období $\Delta\theta_{ai,max}$

10. maximální intenzita výměny vzduchu v místnosti (doporučeno) n_{50}

V této brožuře není možné citovat přesně normu, neboť to neumožňuje zákon, který zakazuje kopírování a šíření částí norem, nicméně je možné uvést přibližné požadavky normy, které platí pro obvyklé stavby, přičemž za obvyklé lze považovat obytné stavby a stavby k trvalému pobytu lidí s běžnými požadavky na mikroklima.

2.1 Nejnižší vnitřní povrchová teplota konstrukce θ_{ai}

Na základě změny normy v r. 2007 se nejnižší povrchová teplota neurčuje tak jako dříve, tedy nejnižší povrchovou teplotou zvětšenou o bezpečnostní přirážku, ale je zaveden nový pojem: teplotní faktor f_{Rsi}. Teplotní faktor { $f_{Rsi} = 1 - (\theta_{ai} - \theta_{si}) / (\theta_{ai} - \theta_e)$ } je bezrozměrné číslo a udává poměrnou teplotu na povrchu v interiéru. Po dosazení vnitřní a vnější teploty pak lze ze vztahu $\theta_{si} = \theta_{ai} - (1 - f_{Rsi}) * (\theta_{ai} - \theta_e)$ vypočítat přesnou povrchovou teplotu. Zavedení teplotního faktoru má tu přednost, že pokud jej kvantifikujeme pro jeden typ detailu, tento teplotní faktor se při běžných rozdílech v okrajových teplotách nemění. Je tedy možné s jeho pomocí spočítat vnitřní povrchovou teplotu u stejného detailu pro různé vnější i vnitřní teploty. Platí požadavek:

$$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,N}$$

kde $f_{Rsi,N}$ je požadovaná hodnota nejnižšího teplotního faktoru vnitřního povrchu stanovená takto:

$$f_{Rsi,N} = f_{Rsi,cr} + \Delta f_{Rsi}$$

kde

$f_{Rsi,cr}$ je kritický teplotní faktor vnitřního povrchu

Δf_{Rsi} je bezpečnostní přirážka

$f_{Rsi,cr} = 1 – (237,3 + 2,1*\theta_{ai}) / (\theta_{ai} – \theta_e) * 1 / (1,1-17,269/\ln(\varphi_i / \varphi_{si,cr})$

kde

θ_{ai} je návrhová teplota interiéru

θ_e je návrhová teplota exteriéru

φ_i návrhová relativní vlhkost vzduchu bez bezpečnostní přirážky

$\varphi_{si,cr}$ kritická relativní vlhkost (pro okna a obdobné konstrukce 100 %, jinde 80 %

Tabulka 1 – pro vnitřní teploty je pak spočítána následující přibližná tabulka kritického teplot. faktoru vnitřního povrchu $f_{Rsi,cr}$ pro relativní vlhkost 50 %

konstrukce	návrhová teplota interiéru θ_{ai} [°C]	návrhová teplota exteriéru θ_e [°C]				
		-13	-15	-17	-19	-21
		kritický teplotní faktor vnitřního povrchu $f_{Rsi,cr}$				
výplň otvorů	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	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 2 – bezpečnostní přirážky teplot. faktoru vnitřního povrchu $\Delta f_{Rsi,cr}$

konstrukce		pokles teploty během vytápění $\Delta\theta_{ai}$ [°C]		
		≤ 2	2 ≤ 5	> 5
		bezpečnostní přirážka teplotního faktoru vnitřního povrchu Δf_{Rsi}		
výplň otvorů	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

Znovu upozorňuji, že při výpočtu pro kritickou teplotu je nutné uvažovat se zvýšenými odpory při přestupu tepla na vnitřní straně $\boldsymbol{R_{si}}$ se podle ČSN EN ISO 13788 a to pro vnější výplně otvorů hodnotou $\boldsymbol{R_{si}}$ = 0,13 $m^2.K.W^{-1}$, pro ostatní vnitřní povrchy konstrukcí zvýšenou hodnotou $\boldsymbol{R_{si}}$ = 0,25 $m^2.K.W^{-1}$.

2.2 Maximální součinitel prostupu tepla U

Druhým požadavkem v ČSN 73 0540-2 je požadavek na maximální součinitel prostupu tepla *U*, který je uveden v článku 5.2. Přibližně se lze řídit podle tabulky 3, která je zde uvedena. Požadavky jsou stanoveny pro konstrukce včetně tepelných mostů, u konstrukcí kde jsou systematické tepelné mosty je nutné tyto tepelné mosty zohlednit, na což se obvykle zapomíná. U lehkých konstrukcí, ať již jde o podkroví či obvodový plášť, jde o tepelné mosty skeletem, u různých kotvících detailů jde např. o tepelné mosty hmoždinkami v zateplovacích systémech, na plochých střechách, může jít i o tepelné mosty mezerami mezi deskami tepelných izolací apod.

Tabulka 3 – požadované a doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla U_N pro budovy s převažující návrhovou vnitřní teplotou θ_{im} = 20 °C

Popis konstrukce	Typ konstrukce	Požadavek U_N [W.m^{-2}.K^{-1}]	Doporučení U_N [W.m^{-2}.K^{-1}]
Střecha plochá a šikmá se sklonem do 45° včetně Podlaha nad venkovním prostorem		**0,24**	**0,16**
Strop pod nevytápěnou půdou se střechou bez tepelné izolace Podlaha a stěna s vytápěním (vnější vrstvy od vytápění)		**0,30**	**0,20**
Stěna venkovní Střecha strmá se sklonem nad 45°	Lehká	**0,30**	**0,20**
	Těžká	**0,38**	**0,25**
Podlaha a stěna přilehlá k zemině (s výjimkou dle pozn. 2) Strop a stěna vnitřní z vytápěného k nevytápěnému prostoru		**0,60**	**0,40**
Strop a stěna vnitřní z vytápěného k částečně vytáp. prostoru Strop a stěna vnitřní z částečně vytápěn. k nevytáp. prostoru		**0,75**	**0,50**
Stěna mezi sousedními budovami Strop mezi prostory s rozdílem teplot do 10 °C včetně		**1,05**	**0,70**
Stěna mezi prostory s rozdílem teplot do 10 °C včetně		**1,3**	**0,90**
Strop mezi prostory s rozdílem teplot do 5 °C včetně		**2,2**	**1,45**
Stěna mezi prostory s rozdílem teplot do 5 °C včetně		**2,7**	**1,80**
Okno a jiná výplň otvoru podle 4.6 z vytápěného Prostoru (pro rám platí $U_f \leq 2{,}0$ W.m^{-2}.K^{-1})	Nová	**1,7**	**1,20**
	Upravená	**2,0**	**1,35**
Okno, dveře, vrata a jiná výplň ve stěně a strmé střeše z vytápěného do částečně vytápěného prostoru nebo z částečně vytápěného prostoru do ne venkovního prostředí		**3,5**	**2,3**
Šikmé střešní okno, světlík a jiná šikmá výplň otvoru se sklonem do 45° z vytápěného prostoru do venkovního prostředí Pro rám vč. tepelně izolačního obkladu platí $U_f \leq 2{,}0$ W.m^{-2}.K^{-1} Okno, dveře, vrata a jiná výplň ve stěně a strmé střeše z vytápěného do částečně vytápěného prostoru nebo z částečně vytápěného prostoru do ne venkovního prostředí		**1,5**	**1,1**
Šikmé střešní okno, světlík a jiná šikmá výplň otvoru se sklonem do 45° z vytáp. prostoru do částečně vytáp. prostoru nebo z částečně vytáp. prostoru do ne venkovního prostředí		**2,6**	**1,7**
Lehká obvodový plášť hodnocený jako smontovaná sestava včetně nosných prvků s průsvitnou výplní otvoru o poměrné ploše $f_w = A_w / A$ [m^2/m^3] A je celková plocha lehkého obvodového pláště A_w je plocha průsvitné výplně otvoru Pro rám platí $U_f \leq 2{,}0$ W.m^{-2}.K^{-1}	$f_w \leq 0{,}5$	**0,3+1,4 f_w**	**0,2+1,0 f_w**
	$f_w > 0{,}5$	**0,7+0,6 f_w**	

1. Požadované a doporučené hodnoty U_N ze vztahů v tabulce 3 se do hodnoty 0,4 zaokrouhlují na setiny a od hodnoty 0,4 výše na pět setin.
2. Pro konstrukce přilehlé k zemině do vzdálenosti 1 m od rozhraní zeminy a vnějšího vzduchu na vnějším povrchu konstrukce se uplatňuji požadované hodnoty pro vnější stěny; ve větší vzdálenosti platí požadované hodnoty uvedené či stanovené pro podlahy a stěny přilehlé k

zemině.Pro toto hodnocení lze zahrnout i tepelnou izolaci podél základů, pokud navazuje na tepelnou izolaci stěny.

3. Při cíleném využití sluneční energie, rekuperace tepla, nebo elektrické energie na vytápění a při návrhu nízkoenergetických domů je vhodné dosahovat 2/3 hodnot doporučených.
4. Součinitel prostupu tepla *U* odpovídá průměrné vnitřní povrchové teplotě θ_{sim} sledované konstrukce; zahrnuje tedy vliv tepelných mostů v konstrukci obsažených (viz ČSN 73 0540-4). Vliv tepelných mostů v konstrukci lze zanedbat, pokud jejich souhrnné působeni je menší než 5 % součinitele prostupu tepla.
5. Součinitel prostupu tepla *U* výplní otvorů se stanovuje včetně vlivu rámů a tepelných mostů mezi rámy a jejich výplněmi podle ČSN EN ISO 10077-1 nebo podle EN ISO 12567-1.
6. Plnění požadavků na výplně otvorů se prokazuje návrhovými hodnotami, které se stanoví bez 15 % přirážky na nízkou tepelnou setrvačnost (zohledňuje se až při výpočtu potřeby energie).
7. Při návrhu a ověření konstrukcí je vhodné uvažovat předpokládané změny užívání v průběhu životnosti budovy.
8. U budov s odlišnými vytápěcími zónami ve smyslu ČSN EN 832 se požadavky stanovují pro každou vytápěnou zónu samostatně podle převažující návrhové vnitřní teploty vytápěné zóny.
9. Sousední vytápěné byty se považují za prostory s rozdílem teplot do 10 °C včetně, sousední temperované byty a provozovny se považují za částečně vytápěné prostory a současně občasně vytápěné byty a provozovny se považují za nevytápěné prostory podle tabulky 3.
10. Není-li pod výplní otvoru otopné těleso, pak se pro výplň otvoru doporučuje snížit požadovanou hodnoty U_N.

11 Při provádění změn užívaných budov v zimním období (např. nástavby, vestavby, přístavby) je nutné zajistit tepelnou ochranu i dočasně ochlazovaných konstrukcí tak, aby nedocházelo k jejich poruchám a vadám.

12 Požadovaná hodnota součinitele prostupu tepla U_N stanovená z tabulky nebo vztahu může být zvýšena do 31.12.2004 u jednovrstvých zděných vnějších stěn na 0,46 $W.m^{-2}.K^{-1}$ a do 31. 12. 2003 u nových oken na 2,0 $W.m^{-2}.K^{-1}$.

2.3 Maximální lineární činitel prostupu tepla ψ_k

Třetím požadavkem v ČSN 73 0540-2 je požadavek na maximální lineární činitel prostupu tepla ψ_k, který je uveden v článku 5.2.5. a jeho požadované hodnoty jsou stanoveny tak, jak uvádí tabulka 4.

Tabulka 4 – požadované a doporučené hodnoty lineárního činitele prostupu tepla ψ_k [W.m^{-1}.K^{-1}]

Typ lineární tepelné vazby	Požadavek	Doporučení
	$\psi_{k,N}$ [W.m^{-1}.K^{-1}]	$\psi_{k,N}$ [W.m^{-1}.K^{-1}]
Vnější stěna navazující na další konstrukce s výjimkou výplně plně otvoru (základ, strop, markýza, střecha…)	0,60	0,20
Vnější stěna navazující na výplň otvoru (okno, dveře, vrata, prosklená stěna)	0,10	0,03
Střecha navazující na výplň otvoru	0,30	0,10

2.4 Maximální bodový činitel prostupu tepla χ_j

Čtvrtým požadavkem v ČSN 73 0540-2 je požadavek na maximální bodový činitel prostupu tepla χ_j, který je uveden v článku 5.2.5. a jeho požadované hodnoty jsou stanoveny tak, jak uvádí tabulka 5.

Tabulka 5 – požadované a doporučené hodnoty bodového činitele prostupu tepla χ_j [W.K^{-1}]

Typ bodové tepelné vazby	Požadavek	Doporučení
	$\chi_{j,N}$ [W.K^{-1}]	$\chi_{j,N}$ [W.K^{-1}]
Průnik tyčové konstrukce (sloupy, nosníky, konzoly) vnější stěnou, podhledem nebo střechou	0,90	0,30

2.5 Maximální součinitel spárové průvzdušnosti i_{LV}

Pátým požadavkem v ČSN 73 0540-2 je požadavek na maximální součinitel spárové průvzdušnosti i_{LV}, který je uveden v článku 7.1.2. Přibližně se lze řídit podle tabulky 6, která je zde uvedena.

Tabulka 6 – maximální požadované hodnoty součinitele spárové průvzdušnosti i_{LV} [$m^3.s^{-1}.Pa^{-0,67}$]

Funkční spára ve výplni otvoru	Požadovaná hodnota součinitele spárové průvzdušnosti $i_{LV,N}$ [$m^3.s^{-1}.Pa^{-0,67}$]	
	Budova s větráním přirozeným nebo kombinovaným	Budova s větráním pouze nuceným nebo s klimatizací
Vstupní dveře do závětří budovy při celkové výšce nadzemní části budovy do 8 m včetně	$1,60.\ 10^{-4}$	$0,87.\ 10^{-4}$
Ostatní vstupní dveře do budovy Dveře oddělující ucelenou část budovy	$0,\ 87.\ 10^{-4}$	$0,30.\ 10^{-4}$
Ostatní vnější výplně otvorů při celkové výšce nadzemní části budovy – do 8 m včetně – mezi 8 m a 20 m – nad 20 m včetně	$0,\ 87.\ 10^{-4}$ $0,60.\ 10^{-4}$ $0,30.\ 10^{-4}$	$0,10.\ 10^{-4}$

POZNÁMKY

1. Kromě hodnoty součinitele spárové průvzdušnosti a součtu délek funkčních spár rozhoduje o pohybu vzduchu v budově především prostorové uspořádání místností a jejich propojení, provozní režim v budově a další skutečnosti.
2. Ucelená část budovy je souvislá funkční část budovy s jednotně řízeným teplotním režimem, jako je např. bytová jednotka, prodejní jednotka, schodiště apod.
3. Pokud se nucené větrání nebo klimatizace navrhují pouze v ucelené části budovy, použijí se odpovídající normové požadavky jen pro tuto ucelenou část budovy.
4. U rozsáhlých budov s rozdílnými výškami nadzemních částí je možné hodnotit splnění normového požadavku samostatně pro jednotlivé ucelené části.
5. Při nesplněni požadavků na funkční spáry dveří dochází k přivádění znečištěného vzduchu z nižších podlaží do podlaží vyšších.
6. Při nesplnění požadavků na funkční spáry u budov s nuceným větráním a klimatizací se zhoršují podmínky pro provoz těchto zařízení a při zpětném získávání tepla z odpadního vzduchu se snižuje jeho účinnost.
7. Požadavky se vztahují i na dveře do větrané spíže nebo spížní skříně, vnitřní dveře mezi garáží nebo místnosti s bazénem a dalšími prostory domu apod.

2.6 Maximální průměrný součinitel prostupu tepla U_{em}

Šestým požadavkem v ČSN 73 0540-2 je požadavek na maximální průměrný součinitel prostupu tepla U_{em}, který je uveden v článku 9.3. Přibližně se lze řídit podle tabulky 7, která je zde uvedena.

Tabulka 7 – maximální průměrný součinitel prostupu tepla U_{em}

Faktor tvaru budovy A / V [m²/m³]	Průměrný součinitel prostupu tepla $U_{em,N}$ [W.m^{-2}.K^{-1}]	
	Požadavek	Doporučení
≤ 0,2	1,05	0,75
0,3	0,80	0,58
0,4	0,68	0,50
0,5	0,60	0,45
0,6	0,55	0,42
0,7	0,51	0,39
0,8	0,49	0,38
0,9	0,47	0,36
≥ 1,0	0,45	0,35
Mezilehlé hodnoty (zaokrouhlené se na setiny)	0,30 + 0,15/(A/V)	0,25 + 0,10/(A/V)

2.7 Maximální pokles dotykové teploty podlahy $\Delta\theta_{10}$

Sedmým požadavkem v ČSN 73 0540-2 je požadavek na maximální pokles dotykové teploty podlahy $\Delta\theta_{10}$, který je uveden v článku 5.3. Přibližně se lze řídit podle tabulky 8, která je zde uvedena.

Tabulka 8 – Požadované hodnoty poklesu dotykové teploty podlahy $\Delta\theta_{10,N}$

Druh budovy a místnosti	Kategorie podlahy	Pokles dotykové teploty podlahy $\Delta\theta_{10,N}$ [K]
Obytná budova: dětský pokoj, ložnice Občanská budova: dětská místnost jeslí, školky, pokoj intenzivní péče, pokoj nemorných dětí	I. velmi teplé	do 3,8 včetně
Obytná budova: obývací pokoj, pracovna, předsíň sousedící s pokoji, kuchyň Občanská budova: operační sál, předsálí, ordinace, přípravna, vyšetřovna, služební místnost, chodba a předsíň nemocnice, pokoj dospělých nemocných, kancelář, rýsovna, kreslírna, pracovna, tělocvična, učebna, kabinet, laboratoř, restaurační místnost. kino, divadlo, hotelový pokoj Výrobní budova: trvalé pracovní místo při sedavé práci	II. teplé	do 5,5 včetně
Obytná budova: koupelna, WC, předsíň před vstupem do bytu Občanská budova: WC, lázeň, převlékárna lázně, chodby, čekárny, schodiště nemocnice, taneční sál, jednací místnost, sklad se stálou obsluhou, prodejna potravin, noclehárna, trvalé pracovní místo ve výstavní síni a muzeu bez podlážky nebo předepsané teplé obuvi Výrobní budova: trvalé pracovní místo bez podlážky nebo předepsané teplé obuvi	III. méně teplé	do 6,9 včetně
Budovy a místnosti bez požadavků	IV. studené	od 6,9

POZNÁMKY

1. Pokles dotykové teploty podlahy $\Delta\theta_{10,N}$ se stanoví podle ČSN 73 0540-4 na základě tepelné jímavosti podlahy B a vnitřní povrchové teploty podlahy θ_{si}
2. Pro podlahy s podlahovým vytápěním se pokles dotykové teploty podlahy $\Delta\theta_{10,N}$ stanovuje a ověřuje pro vnitřní povrchovou teplotu podlahy θ_{si}; stanovenou bez vlivu vytápění při návrhové venkovní teplotě θ_e = 13 °C.

2.8 Maximální zkondenzované množství vodní páry v konstrukci G_k

Osmým požadavkem v ČSN 73 0540-2 je požadavek na maximální množství zkondenzované množství vodní páry v konstrukci G_k. Tento požadavek je stanoven v odstavci 6.1. Pro stavební konstrukce, u kterých by zkondenzovaná

vodní pára uvnitř konstrukce G_k [kg.m^{-2}.a^{-1}] mohla ohrozit jejich požadovanou funkci, nesmí dojít ke kondenzaci vodní páry uvnitř konstrukce, tedy G_k = 0 kg.m^{-2}.a^{-1}.

Pro stavební konstrukce, u kterých kondenzace vodní páry uvnitř neohrozí jejich požadovanou funkci, se požaduje omezení celoročního množství zkondenzované vodní páry uvnitř konstrukce G_k [kg.m^{-2}.a^{-1}] tak, aby splňovalo podmínku $G_k \leq G_{k,N}$.

Pro jednoplášťovou střechu, konstrukci s vnějším tepelně izolačním systémem, vnějším obkladem, popř. jinou obvodovou konstrukci s difuzně málo propustnými vnějšími povrchovými vrstvami, je $G_{k,N}$ = 0,10 kg.m^{-2}.a^{-1} a pro ostatní stavební konstrukce je $G_{k,N}$ = 0,50 kg.m^{-2}.a^{-1}.

Ve stavebních konstrukcí s připuštěnou omezenou kondenzací vodní páry uvnitř konstrukce podle 6.1.2 nesmí v roční bilanci kondenzace a vypařování vodní páry zbýt žádné zkondenzované množství vodní páry, které by trvale zvyšovalo vlhkost konstrukce. Celoroční množství zkondenzované vodní páry uvnitř konstrukce G_k [kg.m^{-2}.a^{-1}] tedy musí být nižší, než celoroční množství vypařitelné vodní páry uvnitř konstrukce G_k [kg.m^{-2}.a^{-1}].

2.9 Tepelná stabilita místnosti v letním období $\Delta\theta_{ai,max}$

Devátým požadavkem v ČSN 73 0540-2 je požadavek na tepelnou stabilitu místnosti v letním období $\Delta\theta_{ai,max}$. Tento požadavek je stanoven v odst. 8.2 a lze vycházet z tabulky 9, která je zde uvedena.

Tabulka 9 – požadované hodnoty nejvyššího denního vzestupu teploty vzduchu v místnosti v letním období $\Delta\theta_{ai,max,N}$ a nejvyšší denní teploty vzduchu v místnosti v letním období $\theta_{ai,max,N}$

Druh budovy		Nejvyšší denní vzestup teploty vzduchu v místnosti v letním období $\Delta\theta_{ai,max,N}$ [°C]	Nejvyšší denní teploty vzduchu v místnosti v letním období $\theta_{ai,max,N}$ [°C]
Nevýrobní		5,0	27
Ostatní s vnitřním zdrojem tepla	do 25 W.m^{-2} včetně	7,5	29,5
	nad 25 W.m^{-2}	9,5	31,5

2.10 Maximální intenzita výměny vzduchu v místnosti (doporučeno) n_{50}

Konečně desátým požadavkem v ČSN 73 0540-2 je požadavek na maximální intenzitu výměny vzduchu v místnosti n_{50}. Tento požadavek již není normou striktně vyžadován, nicméně je doporučován. Je mírně kontroverzní ve vztahu k hygienickým požadavkům, kde je naopak předepsána minimální intenzita výměny vzduchu, která je dána požadavkem člověka na cca 25 m^3 vzduchu za hodinu, popřípadě se vztahuje k další produkci škodlivin v místnosti (např. spaliny z plynových spotřebičů, produkce odérů apod.). Zde je však nutné si uvědomit, že doporučené maximální hodnoty výměny vzduchu se vztahují na rozdíl tlaků 50 Pa uvnitř a vně budovy, na tento rozdíl tlaků však nelze vztahovat větrání, které je nutné zabezpečit stejně kvalitně při jakémkoliv rozdílu tlaků. Z tohoto hygienického požadavku vyplývá, že je nutné zajistit regulovatelnou výměnu vzduchu v závislosti na požadavku mikroklimatu v budově. V tabulce 9 jsou uvedeny normou doporučené maximální hodnoty násobnosti výměny vzduchu při přetlaku 50 Pa.

Tabulka 9 – doporučené maximální hodnoty násobnosti výměny vzduchu při přetlaku 50 Pa

Větrání v budově	Násobnost výměny vzduchu $n_{50,N}$ (h^{-1})
Přirozené	4,5
Nucené	1,5
Nucené s rekuperací	1,0
Nucené s rekuperací u pasivních domů	0,6

3 kondenzace vodní páry v konstrukci

V zimním období je vnější prostředí charakterizováno návrhovými hodnotami, např.: θ_e = -15 °C, φ_e = 84 %. Obsah vodní páry v 1 m^3 vzduchu pak je 1,16 g. Částečný tlak vodní páry je p_d = 139 Pa.

Vnitřní prostředí v obytných prostorách má v zimním období vzduch o návrhových hodnotách θ_{ai} = 21 °C, φ_e = 50 %. Obsah vodní páry v 1 m^3 vzduchu je 9,15 g. Částečný tlak vodní páry je p_d = 1243 Pa a rosný bod 10,2 °C.

Z uvedených stavů vzduchu charakterizovaných příslušnými hodnotami plyne několik důsledků. Evidentní je, že pokud se vzduch vyvětrá, tedy pokud se vnitřní vzduch nahradí vnějším, bude velmi suchý. Pokud se vymění vzduch v místnostech 1x za 2 hodiny, znamená to, že za tyto 2 hodiny se z interiéru odebralo cca 8 g vody na každý m^3 vzduchu. Při ploše místnosti 20 m^2 a světlé výšce 2,6 m to znamená, že za 2 hodiny je možné z místnosti odvést 416 g vody. Méně zřetelné, ale jasné je, že se vodní pára snaží proniknout z vnitřního prostředí, kde je zastoupena více, do vnějšího prostředí. Hnací silou pro toto pronikání je rozdíl částečných tlaků vodních par, v uvedeném případě to je 1243 Pa – 139 Pa = 1104 Pa. To je tlak, který žene vodní páru skrz konstrukci. Protože konstrukce klade vodní páře určitý odpor, dochází k poklesu tlaku vodních par a zároveň ke snížení obsahu vodní páry ve vzduchu. Při pronikání vodní páry konstrukcí pak může dojít k několika situacím. Pokud tlak vodní páry klesá pomalu a teplota rychleji, v určitém místě dojde k poklesu teploty pod rosný bod. Pak v tomto místě dochází ke kondenzaci vodní páry. Druhou mezní situací je, že konstrukce klade vodní páře velký odpor, takže pokles částečného tlaku vodní páry je velmi rychlý a nikde v konstrukci není teplota nižší, než je teplota rosného bodu. Pak je stav v konstrukci ideální, nedochází v ní ke kondenzaci vodní páry.

Z popsaného je zřejmé, že pokud je v interiéru konstrukce, která má relativně malý tepelný odpor, avšak velký odpor proti pronikání vodní páry (difuzní

odpor), jde o stav ideální. Naopak části konstrukce s velkým tepelným odporem by měly být při vnějším povrchu a měly by mít malý difuzní odpor. Toto je důvod, který vede k zateplování, tedy umísťování tepelné izolace z exteriéru. Při umístění tepelné izolace z interiéru dochází směrem ven v konstrukci k rychlému poklesu teploty, částečné tlaky vodní páry však obvykle tak rychle neklesají.

4 výpočet typových tepelných mostů s vyčíslením lineárních činitelů prostupu tepla ψ_k a teplot. faktoru vnitřního povrchu $\Delta f_{Rsi,cr}$

Typové detaily zpracované v této příručce jsou řešeny tak, aby byla proveditelné a přitom aby byla tepelné mosty minimalizovány.

Detaily jsou řešeny podle příslušných norem programem QuickField. Pro výpočet byly použity součinitele přestupu tepla podle místa řešeného detailu, směru přestupu tepla i podle toho, zda byla počítána minimální povrchová teplota či lineární činitel prostupu tepla. Od normy jsme se záměrně odchýlili při výpočtu detailů u terénu, neboť postupy uvedené v normách vedou k přibližným výsledkům, což je již dáno metodou výpočtu (např. podle umístění tepelné izolace se používá normou daná přirážka). Zde jsme volili vlastní model, který je dle našeho soudu bližší realitě, totiž určení Dirichletovy okrajové podmínky pro terén v hloubce 2 m pod povrchem, kde jsme volili teplotu +10 °C. Tato volba není náhodná. Máme k dispozici dlouhodobé měření teplot pod terénem, kde jsme zjistili, že teplota v hlubších vrstvách je konstantní a nemá na ni vliv kolísání exteriérových teplot. V nižších hloubkách se pohybuje okolo 10 až 11 °C. Hloubku 2 m pod terénem jsme volili proto, že podle staré zkušenosti je v hloubce 1 m pod terénem celoročně teplota nad 0 °C, což právě odpovídá námi zvolené hloubce a teplotě. V této souvislosti je nutné upozornit, že veškeré výpočty byly prováděny jako dvourozměrné stacionární vedení tepla, při dynamických výpočtech bychom pravděpodobně dospěli k jiným výsledkům.

Při výpočtech jsme se dopustili i dalších zjednodušení, která však na výsledky výpočtů mají malý vliv. Jako poměrně zásadní je použití tepelné vodivosti minerální vlny ve střešní konstrukci v hodnotě λ = 0,05 $W.m^{-1}.K^{-1}$ proti obvyklé hodnotě λ = 0,04 $W.m^{-1}.K^{-1}$. Tímto zvýšením tepelné vodivosti jsme do

výpočtu zahrnuli vliv systémových tepelných mostů krokvemi a dřevěným roštem, pro přesnější vyčíslení by bylo nutné celý detail počítat jako trojrozměrné vedení tepla, což by výpočet výrazně zkomplikovalo, přitom by se výsledné hodnoty nijak výrazně od námi vypočítaných nelišily.

Velikost detailů byla volena tak, aby v konstrukci v místě ukončení počítaného detailu nedocházelo k dvojrozměrnému vedení tepla, tedy aby zde platila Neumannova podmínka a tepelný tok zde byl ve směru kolmém na konstrukci roven 0.

V ostatních místech byly voleny Newtonovy okrajové podmínky, přičemž součinitel přestupu tepla vyplývá z tepelných odporů při přestupu tepla uvedených v tabulce 10 a teploty vyplývají z hodnot uvedených v tabulce 11.

Tabulka 10 – hodnoty přestupu tepla pro jednotlivé části konstrukcí

Typ přestupu tepla	Hodnota přestupu tepla [$m^2.K.W^{-1}$]
Tepelný odpor při přestupu tepla v interiéru na okenní konstrukci R_{si} =	0,13
Tepelný odpor při přestupu tepla v exteriéru R_{se} =	0,04
Tepelný odpor při přestupu tepla v interiéru na neprůsvitné konstrukci pro výpočet tepelných mostů vodorovně R_{si} =	0,13
Tepelný odpor při přestupu tepla v interiéru na neprůsvitné konstrukci pro výpočet tepelných mostů svisle dolů R_{si} =	0,17
Tepelný odpor při přestupu tepla v interiéru na neprůsvitné konstrukci pro výpočet tepelných mostů svisle nahoru R_{si} =	0,10
Tepelný odpor při přestupu tepla v interiéru na neprůsvitné konstrukci pro výpočet povrchových tepot v horní polovině místnosti R_{si} =	0,25
Tepelný odpor při přestupu tepla v interiéru na neprůsvitné konstrukci pro výpočet povrchových tepot v dolní polovině místnosti R_{si} =	0,35
Tepelný odpor při přestupu tepla v interiéru na neprůsvitné konstrukci pro výpočet povrchových tepot ve velmi nepříznivé části místnosti R_{si} =	0,5
Tepelný odpor při přestupu tepla v interiéru na neprůsvitné konstrukci v suterénních a nevytápěných místnostech R_{si} =	0,13

Tabulka 11 – hodnoty okrajových podmínek

Okrajová podmínka	Hodnota
Venkovní teplota θ_e	-17,0 °C
Teplota vnitřního vzduchu θ_{ai}	+21,0 °C
Relativní vlhkost venkovního vzduchu R_{He}	84,0 %
Relativní vlhkost vnitřního vzduchu R_{Hi}	55,0 %
Teplota 2 m pod terénem	+10 °C
Teplota v suterénních místnostech	+10 °C
Teplota v půdním prostoru	-17,0 °C
Teplota v nevytápěné místnosti (detail 21, spodní místnost)	0 °C

Pro zdivo bylo uvažováno s tepelnou vodivostí λ = 0,135 W.m^{-1}.K^{-1} pro tvarovky P+D a λ = 0,105 W.m^{-1}.K^{-1} pro tvarovky STI), zdivo je uvažováno jako zděné na maltu Cemix Superthetm TM 34.

Skladba zdiva byla uvažována následující: (z interiéru)

- Cemix vnitřní štuk jemný (λ = 0,67 W.m^{-1}.K^{-1}, μ = 30) tl. 2 mm
- Cemix jádrová omítka (λ = 0,37 W.m^{-1}.K^{-1}, μ = 20) tl. 10 mm
- posuzované zdivo P+D nebo STI, různé tloušťky
- Cemix cementový postřik (λ = 0,83 W.m^{-1}.K^{-1}, μ = 30) tl. 2 mm
- Cemix Supertherm TO jádrová omítka (λ = 0,13 W.m^{-1}.K^{-1}, μ = 15) tl. 30 mm
- Cemix vnější štuk (λ = 0,67 W.m^{-1}.K^{-1} μ = 30) tl. 5 mm
- Cemix minerální rýhovaná omítka (λ = 0,57 W.m^{-1}.K^{-1}, μ = 20) tl. 1 mm.

Tabulka 12 – použité součinitele tepelné vodivosti

Název materiálu	Tepelná vodivost λ [$W.m^{-1}.K^{-1}$]
Beton	1,30
Železobeton	1,58
Zdivo P+D	0,135
Zdivo STI	0,105
Dřevo, tep. tok kolmo k vláknům	0,18
Cemix minerální rýhovaná omítka	0,57
Cemix vnější štuk	0,67
Cemix Supertherm TO jádrová omítka	0,13
Cemix jádrová omítka	0,37
Cemix cementový postřik	0,83
Pěnový polystyrén	0,04
Vápenocementová malta	0,97
Minerální vlna ve střešní konstrukci	0,05
Minerální vlna	0,04
Nášlapná vrstva podlahy	1,30
Zdicí malta	0,20
Nosný překlad JISTROP	1,58
Přizdívka	0,86
Pěnový polyuretan	0,03
Sádrokarton	0,22
Cemix vnitřní štuk jemný	0,67
Věncovka	0,86
Extrudovaný polystyrén	0,034
Zásyp zeminou	1,20
Zemina	1,60
Hydroizolace, parotěsná fólie, folie	0,16

Z tepelných toků pak je vyjádřen lineární činitel prostupu tepla ψ. Protože tento činitel prostupu tepla může být používán pro různé výpočty, vyjádřili jsme jej jak ve vztahu k exteriéru, tak i ve vztahu k interiéru, v interiéru pak navíc k vnějším rozměrům (tedy doprostřed konstrukce) a nebo k vnitřním světlým rozměrům. Pro jeho použití při výpočtu z exteriéru je nutné brát jako rozměry konstrukce vnější rozměry až po tepelnou izolaci. Pro lineární činitel prostupu tepla ψ z interiéru je naopak nutné ve výpočtu využívat vnitřní rozměry konstrukcí tam, kde je uvedeno z vnitřních rozměrů a vnější rozměry, u dvou konstrukcí doprostřed dělící konstrukce tam, kde je uvedeno, že se jedná o lineární činitel prostupu tepla z interiéru pro vnější rozměry. Z těchto důvodů se lineární činitel prostupu tepla z exteriéru nerovná součtu lineárních činitelů prostupu tepla z interiéru pro vnitřní (světlé) rozměry, ale rovná se součtu lineárních činitelů prostupu tepla z interiéru pro vnější (osové) rozměry. Protože v mnoha detailech jsou dvě místnosti, uvádíme v interiéru příslušný počet lineárních činitelů prostupu tepla ψ a označujeme je jako horní (H) a dolní (D). Pro vysvětlení je nutné uvést, že lineární činitel prostupu tepla má rozměry $W.m^{-1}.K^{-1}$, nejedná se však o žádnou fyzikální veličinu, jedná se pouze o činitele, s jehož pomocí se zohledňuje dvourozměrné vedení tepla v detailech, jde o smluvní vyjádření přirážky zohledňující vliv dvourozměrného vedení tepla.

Povrchová teplota v interiéru je vyjádřená jako teplotní faktor f_{Rsi} (bezrozměrné číslo) ze vztahu $f_{Rsi} = 1 - (\theta_{ai} - \theta_{si}) / (\theta_{ai} - \theta_e)$. Následně pak lze spočítat povrchovou teplotu pro libovolnou teplotu interiéru a exteriéru dosazením hodnot do následující rovnice: $\theta_{si} = \theta_{ai} - (1 - f_{Rsi}) * (\theta_{ai} - \theta_e)$.

Schéma použitých umístění jednotlivých značek je patrné z níže uvedeného obrázku a řídí se touto konvencí:

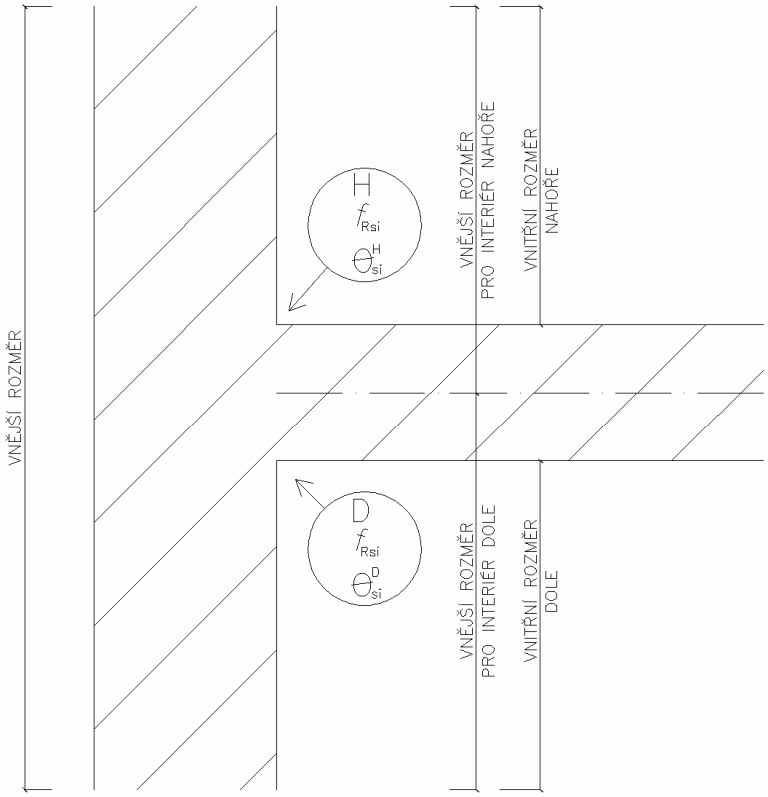
ψ_i^{Di} lineární činitel prostupu tepla - interiér dole z interiérových rozměrů

ψ_i^{Hi} lineární činitel prostupu tepla - interiér nahoře z interiérových rozměrů

ψ_e lineární činitel prostupu tepla - exteriér

ψ_i^{De} lineární činitel prostupu tepla - dole z exteriérových rozměrů

ψ_i^{He} lineární činitel prostupu tepla - nahoře z exteriérových rozměrů

f_{Rsi}^{D} teplotní faktor dole

f_{Rsi}^{H} teplotní faktor nahoře