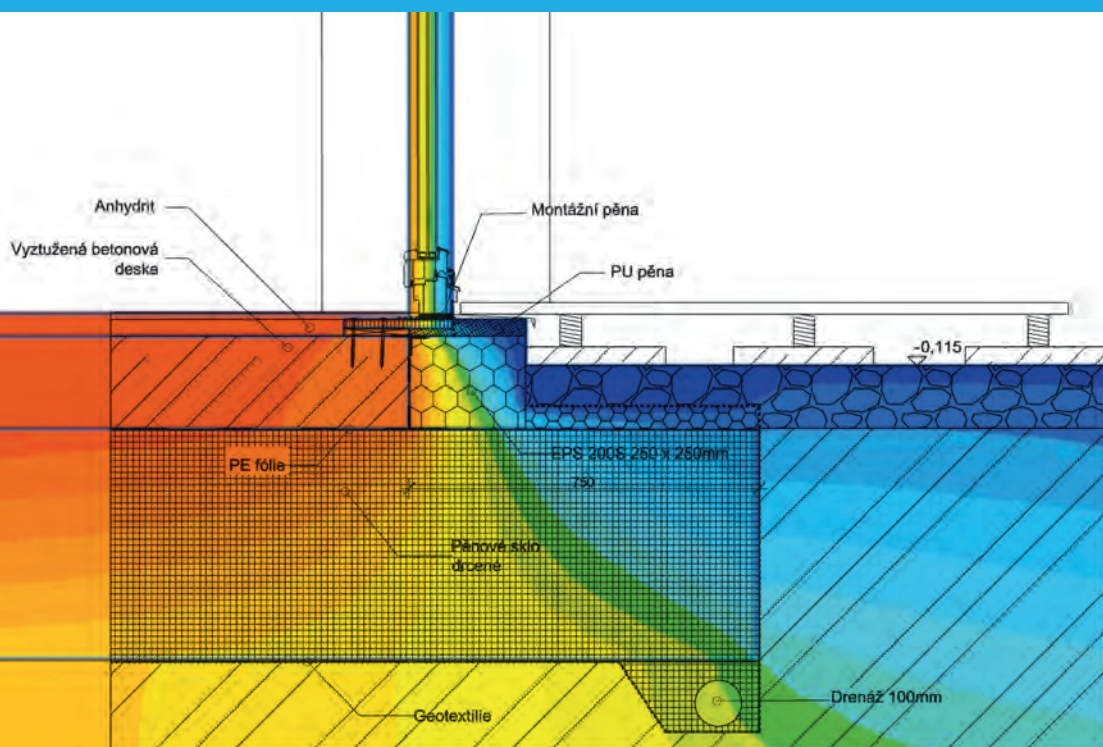


TEPELNÉ MOSTY

PRO NÍZKOENERGETICKÉ A PASIVNÍ DOMY

85 prověřených a spočítaných stavebních detailů



Detail 43 Práh dveří na terasu

Roman Šubrt a kolektiv

TEPELNÉ MOSTY

PRO NÍZKOENERGETICKÉ A PASIVNÍ DOMY

85 prověřených a spočítaných stavebních detailů

edice
stavitel

Grada Publishing

Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodukována a šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu nakladatele. Neoprávněné užití této knihy bude **trestně stíháno**.



Ing. Roman Šubrt a kolektiv

Tepelné mosty

Pro nízkoenergetické a pasivní domy

Vydala Grada Publishing, a.s.

U Průhonu 22, Praha 7

obchod@grada.cz, www.grada.cz

tel.: +420 234 264 401, fax: +420 234 264 400

jako svou 4630. publikaci

Odpovědná redaktorka Eva Škrabalová

Sazba Jan Šístek

Detail na obálce Juraj Hazucha

Fotografie v textu z archivu autora

Počet stran 224

První vydání, Praha 2011

Vytiskly Tiskárny Havlíčkův Brod, a. s.

© Grada Publishing, a.s., 2011

Cover Design © Grada Publishing, a.s., 2011

Názvy produktů, firem apod. použité v knize mohou být ochrannými známkami nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků.

ISBN 978-80-247-4059-1 (tištěná verze)

ISBN 978-80-247-7564-7 (elektronická verze ve formátu PDF)

ISBN 978-80-247-7565-4 (elektronická verze ve formátu EPUB)

Obsah

1	Úvod	7
2	Tepelné mosty	9
2.01	Definice tepelného mostu	9
2.02	Optimalizace tepelného mostu	11
2.03	Lineární a bodový činitel prostupu tepla	13
2.04	Povrchová teplota a teplotní faktor	16
2.05	Web www.tepelnymost.cz	16
3	Tepelně technické výpočty	19
3.01	Teplotní pole	19
3.02	Obecná problematika vlhkosti	22
3.03	Tepelná vodivost	22
3.04	Zjednodušení výpočtů používané v tepelné technice ve stavební praxi	28
4	Požadavky na pasivní domy	29
4.01	Vznik pasivních domů	29
4.02	Důvody pro stavbu pasivních domů	30
4.03	Pasivní dům dle PHPP	30
4.04	Pasivní dům dle TNI 73 0329 a 73 0330	32
5	Praktická část	33
	Detail 1 – Kotvení hmoždinkami	34
	Detail 2 – Ztužující věnec	42
	Detail 3 – Zdivo s kontaktním zateplením	44
	Detail 4 – Zdivo s kontaktním zateplením	46
	Detail 5 – Zdivo se zateplením celulosou	48
	Detail 6 – Neodvětraná fasáda	50
	Detail 7 – Odvětraná fasáda	52
	Detail 8 – Zdivo s vnitřním zateplením	54
	Detail 9 – Napojení obvodové stěny a stropu	56
	Detail 10 – Napojení obvodové stěny a stropu	58
	Detail 11 – Zdivo s vnějším zateplením	60
	Detail 12 – Napojení obvodové stěny a stropu	62
	Detail 13 – Napojení obvodové stěny a stropu	64
	Detail 14 – Věnec pod nevytápěnou půdou	66
	Detail 15 – Přístavba garáže	68
	Detail 16 – Nadpraží okna a ztužující věnec	70
	Detail 17 – Ostění okna	72
	Detail 18 – Parapet okna	74
	Detail 19 – Práh balkónových dveří na terasu	76
	Detail 20 – Nadpraží okna, ploché překlady, panely	78
	Detail 21 – Nadpraží okna, překlad NOP, panely	80
	Detail 22 – Nadpraží okna, překlad, vložkový strop	82
	Detail 23 – Ostění okna	84
	Detail 24 – Parapet okna	86
	Detail 25 – Ostění okna – okno v tepelné izolaci	88
	Detail 26 – Ostění okna – okno ve zdivu	90
	Detail 27 – Nadpraží okna – okno v tepelné izolaci	92
	Detail 28 – Nadpraží okna s roletou	94
	Detail 29 – Ostění okna – nevětraná fasáda	96
	Detail 30 – Parapet okna – nevětraná fasáda	98
	Detail 31 – Parapet okna, vnitřní hliněná omítka	100
	Detail 32 – Nadpraží okna – vnitřní zateplení	102
	Detail 33 – Nadpraží se žaluzií	104

Detail 34 – Ostění okna	106
Detail 35 – Parapet okna	108
Detail 36 – Nadpraží okna	110
Detail 37 – Nadpraží se žaluzií	112
Detail 38 – Ostění okna	114
Detail 39 – Parapet okna	116
Detail 40 – Práh vstupních dveří	118
Detail 41 – Práh balkónových dveří	120
Detail 42 – Práh vstupních dveří	122
Detail 43 – Práh dveří na terasu	124
Detail 44 – Práh vstupních dveří	126
Detail 45 – Dveřní otvor, práh	128
Detail 46 – Terasa a obvodové zdivo	130
Detail 47 – Zdivo u pozednice	132
Detail 48 – Napojení zdiva a střechy u štítu	134
Detail 49 – Dodatečné zateplení střechy	136
Detail 50 – Dodatečné zateplení střechy	138
Detail 51 – Dodatečné zateplení střechy	140
Detail 52 – Dodatečné zateplení střechy	142
Detail 53 – Zdivo u pozednice	144
Detail 54 – Napojení zdiva a střechy u pozednice	146
Detail 55 – Stěna u pozednice	148
Detail 56 – Napojení zdiva a střechy u štítu	150
Detail 57 – Napojení zdiva a střechy u štítu	152
Detail 58 – Štítová stěna	154
Detail 59 – Napojení střechy a obvodové stěny	156
Detail 60 – Atika – nevětraná fasáda	158
Detail 61 – Vrcholová vaznice	160
Detail 62 – Napojení střechy a obvodové stěny	162
Detail 63 – Pozednice	164
Detail 64 – Napojení pultové střechy a stěny	166
Detail 65 – Vrcholová vaznice – foukaná izolace	168
Detail 66 – Podkroví, šikmá střecha z panelů YTONG	170
Detail 67 – Štít – šikmá střecha z panelů	172
Detail 68 – Atika, střecha z panelů YTONG	174
Detail 69 – Střešní atika	176
Detail 70 – Atika	178
Detail 71 – Strop nad posledním podlažím, u štítu	180
Detail 72 – Stěna s příhradovým vazníkem	182
Detail 73 – Stěna s příhradovým vazníkem	184
Detail 74 – Základ, podlaha zároveň s terénem	186
Detail 75 – Základ, podlaha 300 mm nad terénem	188
Detail 76 – Základ, podlaha 1200 mm nad terénem	190
Detail 77 – Stěna u základu, základový pas	192
Detail 78 – Stěna u základu, základová deska	194
Detail 79 – Základ nepodsklepené budovy	196
Detail 80 – Základ nepodsklepené budovy	198
Detail 81 – Základ nepodsklepené budovy	200
Detail 82 – Zdivo u základu, nepodsklepený objekt	202
Detail 83 – Vnitřní nosná stěna u základu	204
Detail 84 – Zdivo u základu, nepodsklepený objekt	206
Detail 85 – Sokl – foukaná tepelná izolace	208
6 Přílohy	211
7 Použité značky	218
8 Literatura	220
9 Poděkování	222

1 Úvod

Stavebnictví se v současné době stále více ubírá směrem k co největším úsporám energií a tím i k výstavbě nízkoenergetických a pasivních domů. S touto problematikou úzce souvisí i problematika tepelných mostů, která je obsahem právě vydávané publikace. Kniha Tepelné mosty – Detaily pro nízkoenergetické a pasivní domy je pokračováním dlouholeté práce ing. Šubrta věnované tomuto oboru a navazuje na předchozí velmi úspěšný díl, který vyšel v září 2008 pod názvem Katalog tepelných mostů, 1 – Běžné detaily. V tomto (druhém) díle autoři reagují na velký zájem o pasivní a nízkoenergetické stavby, který byl vyvolán především startem dotací „Zelená úsporám“, a přinášejí v něm detaily běžně používané ve stavbách s nízkou spotřebou energie. Stavební detaily respektují českou realitu, české způsoby stavení a obvyklé stavební materiály stejně jako první díl, který byl mimo jiné i proto doporučen Českou komorou autorizovaných inženýrů a techniků činných ve stavebnictví (ČKAIT) jako publikace určená pro další vzdělávání stavebních inženýrů a techniků činných ve výstavbě.

Kvalitu tepelně technických vlastností obálky budovy tvoří především kvalita detailu. Zásady navržených stavebních detailů vycházejí z toho, že navržené detaily musí odpovídat požadavkům, musí být realizovatelné a musí jít o co nejjednodušší způsob řešení.

Ani tato kniha není schopna obsáhnout všechny řešené tepelné mosty, a tak byla zřízena webová stránka www.tepelnymost.cz, kde jsou postupně tak, jak čas dovolí, uveřejňovány tepelné mosty, a to jak jejich číselné hodnoty, tak i výkresy ve formátu dwg.

Publikaci zpracoval kolektiv autorů pod vedením ing. Romana Šubrta. Kapitulu věnovanou teplotnímu poli a obecné problematice vlhkosti zpracoval ing. Martin Škopek, Ph.D. Kapitulu věnovanou tepelné vodivosti zpracoval pan Jan Kurc ze společnosti URSA. Převážnou část výběru detailů a matematické simulace připravila ing. Pavlína Charvátová z Vysoké školy technické a ekonomické v Českých Budějovicích (VŠTE ČB). Některé detaily byly počítány podle vlastního technického řešení, některé byly převzaty z těchto projektů: detaily 5, 61, 62, 64, 65 a 44 jsou převzaty z projektů ing. arch. Aleše Brotánka, detaily 31, 63 a 85 jsou převzaty z projektu ing. Juraje Hazuchy, detaily 6, 7, 28, 29, 30, 43 a 60 jsou převzaty z projektů Mgr. art. Bjørna Kierulfa, detaily 25, 26 a 77 jsou od ing. Martina Konečného, detaily 59 a 78 od ing. Rostislava Kubíčka a detaily 56 a 69 od ing. Romana Šubrta. Na knize se dále podíleli ing. Petr Kapička, ing. Iva Wohlschlägerová, Václav Beneš a Daniel Šubrt.

Obrázek 9 je převzat z publikace Josého Pijoana, Dějiny umění.

Autorský tým

Roman Šubrt

Absolvoval FSv ČVUT (1985) se zaměřením na stavební fyziku. Autorizovaný inženýr v oboru Pozemní stavby a Energetické auditorství, soudní znalec v oboru Pozemní stavitelství a v oboru Energetika. V roce 2010 získal jako jeden z prvních v ČR mezinárodní certifikaci „Certified Passive House Designer“.





Martin Škopek

Od absolvování postgraduálního studia v oboru teoretické elektrotechniky na Západočeské univerzitě v Plzni (2002) se nadále intenzivně věnuje simulacím fyzikálních polí a problematice úspor energie.



Pavlína Charvátová

Vystudovala stavební fakultu ČVUT v Praze (2007). Od roku 2007 spolupracuje se společností Energy Consulting Service, s. r. o., kde se věnuje především tepelným mostům a energetickému hodnocení staveb.



Jan Kurc

Profesně se věnuje problematice praktického zateplování budov asi sedmnáct let, od roku 2003 pracuje jako technik pro firmu URSA v ČR a SR.



Bjørn Kierulf

Původem je Nor a průmyslový designér. Společně s manželkou Zuzanou se v architektonickém studiu CREATERRA specializuje na pasivní domy a přírodní materiály ve stavebnictví.



Juraj Hazucha

Absolvent Fakulty stavební STU v Bratislavě se o pasivní domy a přírodní materiály zajímá od roku 2003. Po roční inženýrské praxi v Anglii nastoupil v roce 2007 jako odborný poradce do Centra pasivního domu.



Jiří Čech

Autorizovaný inženýr v oboru Pozemní stavby a Statika a dynamika je členem pracovní skupiny o. s. Ekodům. V roce 2010 získal jako jeden z prvních mezinárodní certifikaci „Certified Passive House Designer“.



Aleš Brotánek

Autorizovaný architekt, vystudoval VŠUP, od roku 1984 se orientuje na energeticky úspornou architekturu. Dnes vede AB ateliér, který navrhuje stavby pouze na principech pasivního domu.



Rostislav Kubíček

Vystudoval VUT FAST Brno se zaměřením na pozemní stavby a stavební fyziku. Od roku 2008 je spolumajitelem a hlavním inženýrem ateliéru Vize Atelier, s. r. o., který je členem Centra pasivního domu.

2 Tepelné mosty

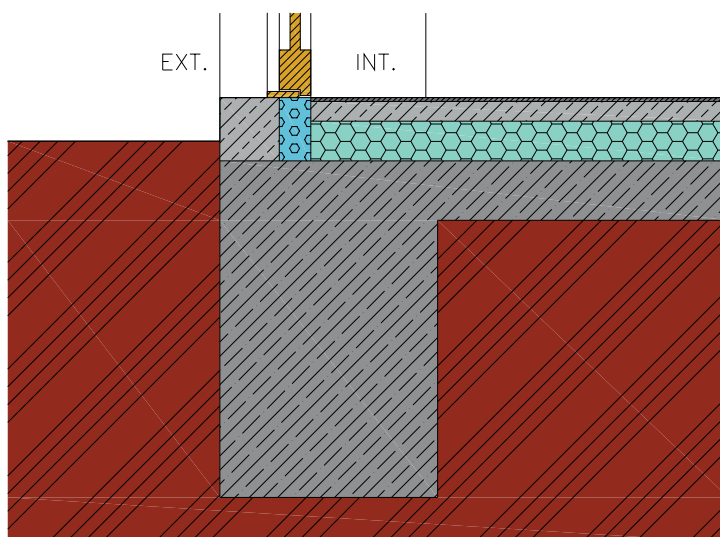
2.01 Definice tepelného mostu

Tepelný most je místo, v němž dochází k vícerozměrnému vedení tepla. Tepelné mosty mohou být způsobeny vedením, prouděním i sáláním. Ve stavební praxi se lze obvykle setkat s tepelnými mosty způsobenými vedením tepla. Ty lze přesněji rozdělit na tepelné mosty v konstrukci a tepelné vazby. **Tepelná vazba** je typ tepelného mostu vznikající stykem dvou různých konstrukcí. Jedná se např. o okenní ostění, roh budovy, kde je styk dvou stěn apod. **Tepelné mosty v konstrukci** mohou být nahodilé (např. způsobené nepravidelným promaltováním cihel nebo konzolou na parabolu jdoucí skrz tepelnou izolaci apod.) nebo systematické (např. krokve nebo hmoždinky kotvící tepelnou izolaci).

Všechny tyto detaily je nutné řešit tak, aby splňovaly tyto požadavky:

- po celou dobu životnosti stavby nesmí dojít k porušení konstrukce;
- vnitřní povrch konstrukce musí mít takovou teplotu, aby na ní nerostly plísň;
- detail musí umožňovat, aby stavba byla plně funkční, tedy musí mít příslušnou nosnost dle umístění,
- musí být vzduchotěsný;
- musí být na stavbě realizovatelný.

Detail se obvykle navrhuje jako řez daným místem, tedy má pouze dva rozměry, ovšem realita je jiná, na stavbě se provádí v trojrozměrném prostoru. Pokud se navrhuje jakýkoliv detail, je třeba dbát na to, jak se bude na stavbě realizovat a jak bude probíhat tepelný tok nejen v kresleném místě, ale i tam, kde daný typický řez končí a dochází k trojrozměrnému vedení tepla. Typickým příkladem může být detail prahu dveří v cihelné stavbě s vnějším kontaktním zateplovacím systémem, viz obr. 1. Detail ostění je na obr. 2. Detail prahu dveří



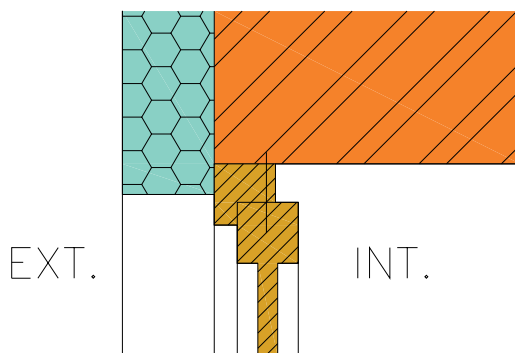
Obr. 1 Práh dveří v cihelné stavbě s vnějším kontaktním zateplovacím systémem

vypadá vhodně řešený, stejně tak detail ostění. To však jen do té doby, než si uvědomíme, že práh přede dveřmi vede teplo i do stran, kde způsobuje značný tepelný most, viz obr. 3.

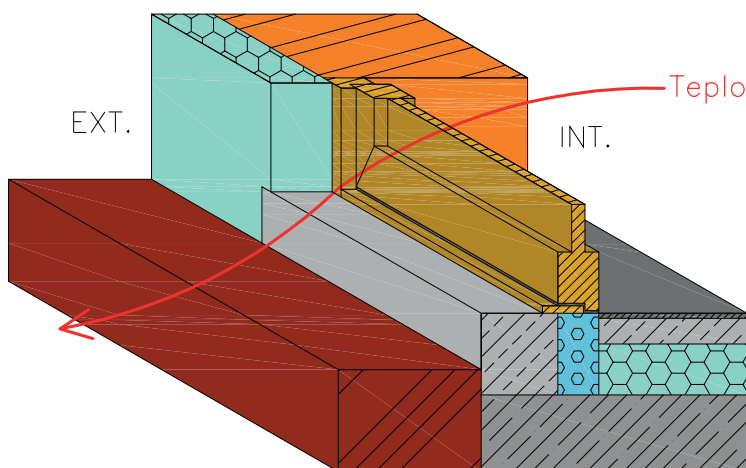
Při řešení detailu je také důležité, aby tímto místem docházelo k co nejnižším tepelným ztrátám, tedy aby zde byl tepelný tok co nejnižší. Jak to vypadá v místě neřešeného tepelného mostu, lze dokumentovat na detailu balkonu rodinného domu. Dříve se obvykle balkony navrhovaly jako ocelové nosníky a mezi ně se provedl klasický železobetonový strop. Tento typ řešení však může mít stejnou tepelnou ztrátu jako celý zbývající rodinný dům.

Tepelné mosty prouděním mohou vznikat tam, kde do konstrukce proniká vzduch z exteriéru a šíří tak teplo. Typický příklad je na termogramu 1, kde šipka ukazuje na místo, kde dochází k pronikání vzduchu z exteriéru mezi interiérový sádrokarton a tepelnou izolaci umístěnou za ním.

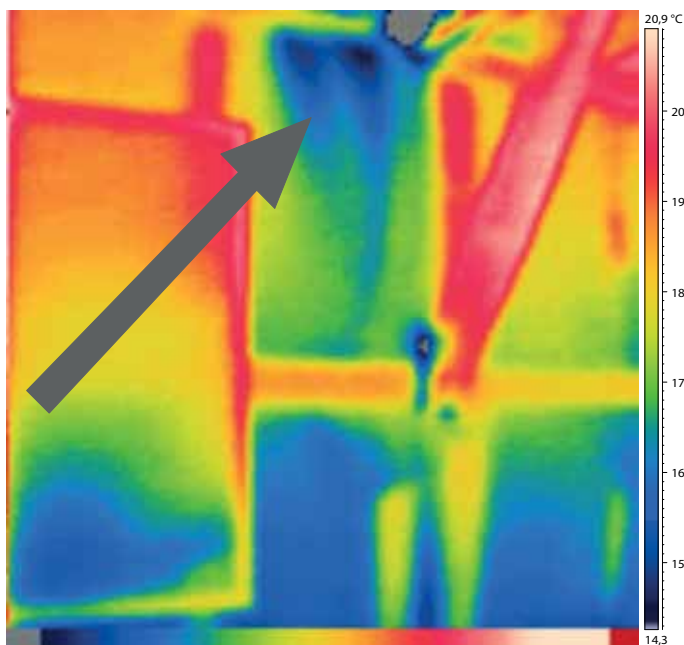
Tepelné mosty sáláním mohou vznikat tam, kde je jako tepelná izolace použita reflexní materiál, avšak ten se dotýká jiné konstrukce, takže zde nedochází k omezení výměny tepla sáláním tak jako v ostatních místech konstrukce. (Upozornění: vliv reflexních materiálů je velmi často nadhodnocován, vhodnější je používat klasické tepelné izolace, které izolují vedení tepla.)



Obr. 2 Detail ostění dveří



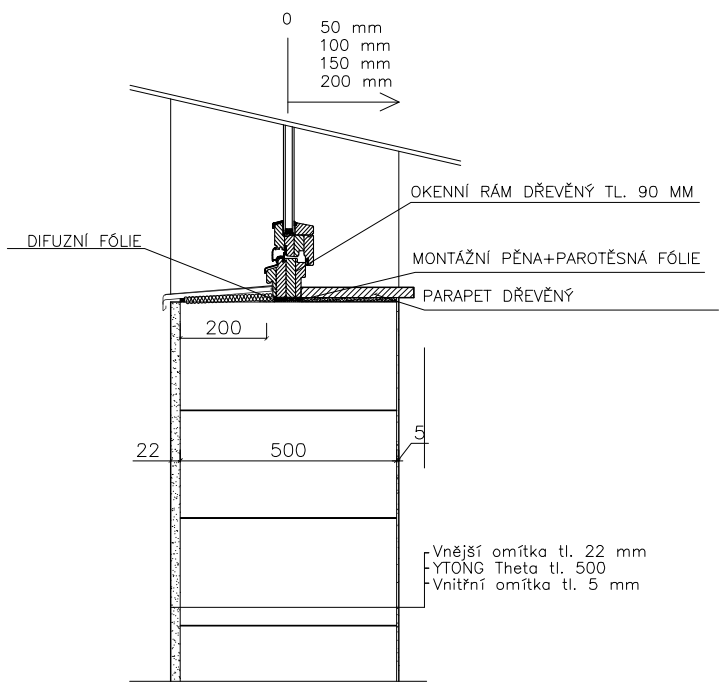
Obr. 3 Práh dveří v trojrozměrném zobrazení



Termogram 1 Termogram podkroví s vyznačením tepelného mostu konvenčí.

2.02 Optimalizace tepelného mostu

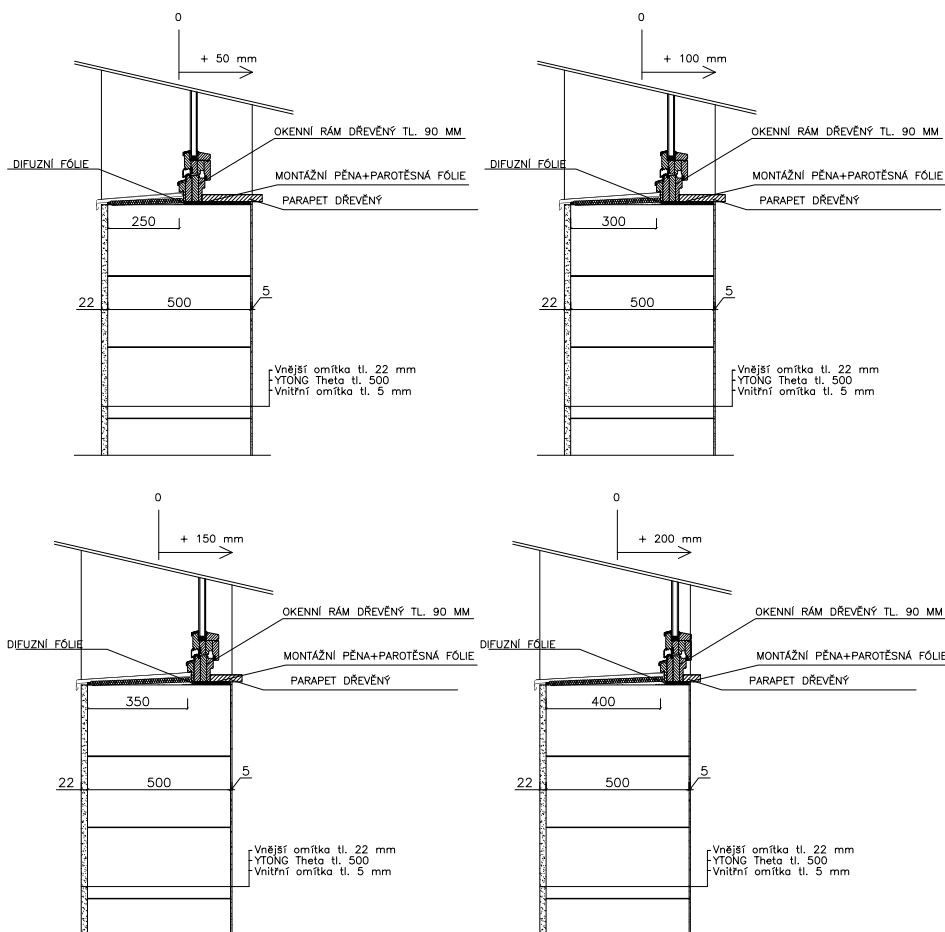
Při řešení stavebních detailů je nutné postupovat tak, aby splňovaly všechny na něj kladené požadavky, z hlediska tepelné techniky pak zejména vnitřní povrchovou teplotu. Na obr. 4 je detail parapetu okna při použití zdiva z Ytongu Theta. Tento materiál má vynikající tepelně izolační vlastnosti, proto se nepředpokládá, že by zde mohly nastat problémy. Výpočtem se však zjistilo, že vnitřní povrchová teplota byla nižší, než požadují normy. Proto bylo nutné detail změnit tak, aby byly dodrženy normy a nehrozil vznik plísní. V zásadě bylo možné postupovat více způsoby. Prvním je nahradit vnější část zdiva materiálem s lepšími tepelně izolačními vlastnostmi. Protože se jedná o stěnu z Ytongu, je logické použít materiál stejného výrobce s lepšími tepelně izolačními vlastnostmi. Tím je Multipor. Toto řešení by jistě bylo z hlediska řešení tepelného mostu možné. Bylo však nakonec zavrženo, neboť bylo jasné, že technologickou nezádní by buď nedošlo k zabudování Multiporu, a nebo by bylo okolo něj použito lepidlo tak, že jeho význam jako tepelné izolace by byl eliminován. Druhou možností bylo posunout okno do interiéru. Tím sice dojde ke zvýšení úniků tepla, neboť teplotní pole bude více zakřivené, ovšem dojde k přivedení většího množství tepla na vnitřní povrch a tím i ke zvýšení teploty tohoto místa. Toto řešení bylo vyčísleno. Na obr. 5 je schéma parapetu okna s tím, že postupně docházelo k simulaci posunu okna do interiéru. I toto řešení bylo zamítnuto, neboť by bylo nutné takto posunout všechny otvorové výplně a došlo by ke změně vzhledu domu. Jako poslední možné řešení se jevilo do interiéru umístit tepelně vodivý materiál tak, aby bylo k povrchu přivedeno teplo. Bylo zvoleno použití vnitřního parapetu z kamene nebo z teraca. Toto řešení se v daném případě jevilo jako optimální. V tab. 1 jsou uvedeny hodnoty povrchových teplot, teplotních faktorů a lineárních činitelů prostupu tepla pro jednotlivé popsané varianty.



Obr. 4 Detail parapetu okna

Tab. 1 Povrchová teplota, teplotní faktor a lineární činitel pro jednotlivé varianty z obrázku 5

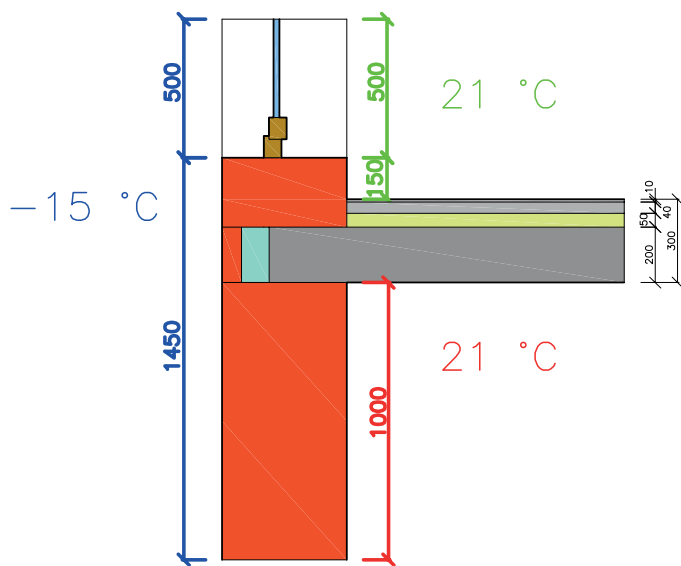
Parametr			Zdivo tvarovky YTONG (P1,8 tl. 500)					
			parapet dřevěný					parapet kamenný
			0	+ 50 mm	+ 100 mm	+ 150 mm	+ 200 mm	0
Teplota v místě styku rámu okna se zdívem (parapetem) v interiéru	Teplotní faktor f_{Rsi} [-]		0,767	0,772	0,779	0,791	0,818	0,850
	Poměrný teplotní rozdíl vnitřního povrchu ξ_{Rsi} [-]		0,233	0,228	0,221	0,209	0,182	0,150
	Vnitřní minimální povrchová teplota [°C] pro teplotu interiéru 21 °C a exteriérových teplotách:	-13,0	13,1	13,3	13,5	13,9	14,8	15,9
		-15,0	12,6	12,8	13,0	13,5	14,5	15,6
		-17,0	12,1	12,3	12,6	13,0	14,1	15,3
Lineární činitel prostupu tepla z exteriéru ψ_e [W/(m.K)]			0,012	0,013	0,017	0,026	0,044	0,028
Lineární činitel prostupu tepla z interiéru ψ_i [W/(m.K)]			0,012	0,013	0,017	0,026	0,044	0,028



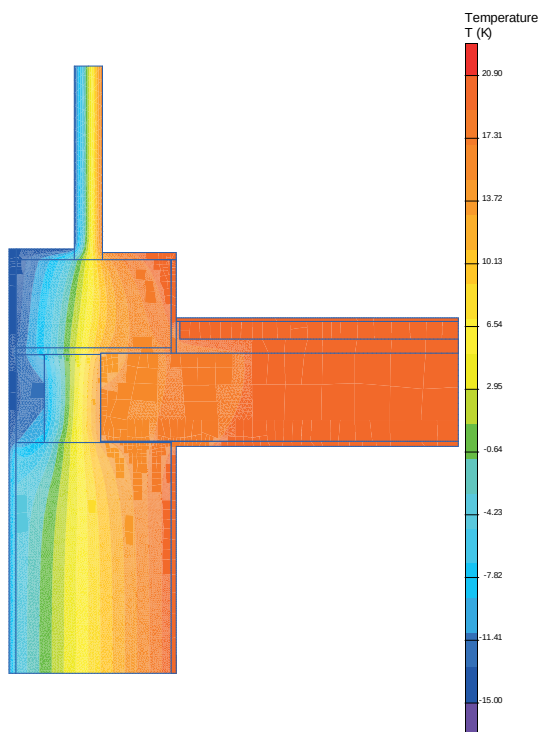
Obr. 5 Simulace posunu okna do interiéru

2.03 Lineární a bodový činitel prostupu tepla

Zvýšení tepelného toku se ve stavební terminologii vyjadřuje lineárním či bodovým činitelem prostupu tepla a označují se ψ [W/(m.K)] a χ [W/K]. Je nutné si uvědomit, že tyto pojmy **nemají žádné fyzikální opodstatnění**. Nejde o fyzikální veličiny, jde pouze o zavedení konstant, které vyjadřují rozdíl mezi jednorozměrným vedením tepla a dvoj- či trojrozměrným. Nejde tedy o vlastnost materiálu, vlastnost konstrukce či geometrického řešení, ale o rozdíl mezi skutečným stacionárním vedením tepla a teoretickým jednorozměrným stacionárním vedením tepla. Tímto způsobem se také počítají. Na obr. 6 je znázorněn práh francouzského okna se stropem a obvodovou stěnou. V případě, že je třeba kvantifikovat tepelný most, tedy vypočítat lineární činitel prostupu tepla, musí se nejprve analyzovat teplotní pole (rozložení teplot viz obr. 7). Následně se určí tepelné toky, v tomto konkrétním případě tepelný tok na hranici konstrukce a exteriéru (modré kóty na obrázku 6) a na hranici konstrukce a interiéru pro spodní místnost (červené kóty na obrázku 6) a pro horní místnost (zelené kóty v obrázku 6). Tepelné toky směrem do konstrukce, tedy na straně interiéru, a směrem z konstrukce, tedy



Obr. 6 Práh francouzského okna se stropem a obvodovou stěnou



Obr. 7 Rozložení teplot k detailu na obrázku 6

na straně exteriéru, se musí rovnat, pouze mají opačné znaménko. (Zjednodušeně: teplo, které do konstrukce vtéká, z ní musí za ustáleného teplotního stavu také vytékat.) Dále se vypočítají tepelné toky pro jednorozměrné vedení tepla. Spočítá se součinitel prostupu tepla s použitím stejných parametrů jako u dvojrozměrného vedení tepla a vynásobí se plochou konstrukce v hodnoceném detailu. Dále se odečte tepelný tok vypočtený pro jednorozměrné vedení tepla od tepelného toku skutečného, tedy vypočteného pro dvojrozměrné vedení tepla. Výsledek se vydělí rozdílem teplot mezi exteriérem a interiérem a tím se získá lineární činitel prostupu tepla. Z uvedeného je patrné, že je velmi důležité, jaké rozměry se při výpočtu používají. Pokud je třeba provést výpočet pro exteriér, použijí se rozměry zdi získané z exteriéru, pokud je třeba výpočet provést pro interiéru, použijí se rozměry místností získané z interiéru. Stejně tak je potřeba dbát na to, jaké se ve výpočtu používají rozměry okna, zda se jedná o skladebné nebo o čisté rozměry okna nebo zda o světlý rozměr okenního otvoru. Při výpočtu tepelné ztráty objektu či potřeby tepla na vytápění je pak nutné používat stejné rozměry, jaké jsou uvedeny v kvantifikaci tepelného mostu. Pozor! Některé lineární činitele prostupu tepla mohou být uváděny i pro jiné rozměry, než jsou vnější či vnitřní rozměry. Typickým příkladem může být výpočet tepelných mostů u staveb se zateplením. Zde může být pro zjednodušení použit i rozměr konstrukce bez zateplení. Následně pro výpočet tepelných ztrát a potřeby tepla na vytápění, resp. pro výpočet optimální varianty zateplení není nutné měnit vnější rozměry (plochy stěn) objektu v závislosti na projektované tloušťce zateplení.

Jak vyplývá z postupu výpočtu, je rozhodující i tvarové řešení detailu. Znamená to, že pokud se např. použije okenní rám o větší stavební hloubce, bude lineární činitel prostupu tepla jiný než při použití slabšího okenního rámu.

Příklad výpočtu:

Tepelný tok na straně exteriéru získaný z dvojrozměrného výpočtu vedení tepla: $Q_{e2D} = 39,30 \text{ W}$.
Tepelný tok na straně interiéru získaný z dvojrozměrného výpočtu vedení tepla v dolní místnosti: $Q_{id2D} = 12,20 \text{ W}$.

Tepelný tok na straně interiéru získaný z dvojrozměrného výpočtu vedení tepla v horní místnosti: $Q_{ih2D} = 27,10 \text{ W}$.

Součinitel prostupu tepla stěny: $U_{stěny} = 0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Součinitel prostupu tepla okna: $U_{okna} = 1,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Plocha stěny z exteriéru (modré kóty): $S_{estěna} = 1,45 \cdot 1 = 1,45 \text{ m}^2$.

Plocha stěny z interiéru pro dolní místnost (červené kóty): $S_{idstěna} = 1,00 \text{ m} \cdot 1 = 1,00 \text{ m}^2$.

Plocha stěny z interiéru pro horní místnost (zelené kóty): $S_{ihstěna} = 0,15 \text{ m} \cdot 1 = 0,15 \text{ m}^2$.

Plocha okna (z exteriéru i z interiéru je stejná, modré a zelené kóty):

$S_{okna} = 0,50 \text{ m} \cdot 1 = 0,50 \text{ m}^2$.

Tepelný tok získaný z jednorozměrného vedení tepla pro exteriér

$Q_e = (U_{stěny} \cdot S_{estěna} + U_{okna} \cdot S_{okna}) \cdot \theta A = (0,25 \cdot 1,45 + 1,20 \cdot 0,50) \cdot 36 = 34,65 \text{ W}$.

Tepelný tok získaný z jednorozměrného vedení tepla pro dolní místnost z interiéru:

$Q_{id} = (U_{stěny} \cdot S_{idstěna}) \cdot \theta A = (0,25 \cdot 1,00) \cdot 36 = 9,00 \text{ W}$.

Tepelný tok získaný z jednorozměrného vedení tepla pro horní místnost z interiéru:

$Q_{ih} = (U_{stěny} \cdot S_{ihstěna} + U_{okna} \cdot S_{okna}) \cdot \theta A = (0,25 \cdot 0,15 + 1,20 \cdot 0,50) \cdot 36 = 22,95 \text{ W}$.

Lineární činitel prostupu tepla pro exteriér:

$\psi_e = (Q_{e2D} - Q_e) / (\theta A) = (39,30 - 34,65) / (36) = 0,129 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

Lineární činitel prostupu tepla pro interiéru pro dolní místnost:

$\psi_{id} = (Q_{id2D} - Q_{id}) / (\theta A) = (12,20 - 9,00) / (36) = 0,089 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

Lineární činitel prostupu tepla pro interiéru pro horní místnost:

$\psi_{ih} = (Q_{ih2D} - Q_{ih}) / (\theta A) = (27,10 - 22,95) / (36) = 0,115 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

2.04 Povrchová teplota a teplotní faktor

Při hodnocení stavebních detailů z hlediska povrchových teplot je důležité, aby povrchová teplota nepoklesla pod teplotu, při níž dochází k růstu plísní. Protože z průzkumů vyplývá, že k masivnímu růstu plísní dochází již při zvýšení relativní vlhkosti vzduchu na 80 %, je v normě pro konstrukce uvedena maximální teplota při dané vlhkosti pro danou teplotu interiéru pro tuto vlhkost. U oken je tento požadavek mírně nižší, zde se připouští zvýšení relativní vlhkosti vzduchu do 100 %.

Pokud se provádí hodnocení stavebních detailů výpočtem dvou- či trojrozměrného stationárního teplotního pole, vychází se zpravidla z konkrétních vnitřních a vnějších teplot. Aby bylo možné takto získané povrchové teploty lépe přepočítat pro jiné podmínky exteriéru či interiéru, byl zaveden teplotní faktor f_{Rsi} , což je bezrozměrné číslo. Teplotní faktor vyjadřuje poměr rozdílu teplot mezi exteriérem a vnitřním povrchem a rozdílu teplot mezi exteriérem a interiérem. Z této definice je jasné, že se jedná o číslo v intervalu 0 až 1. Pro výpočet teplotního faktoru je nutné znát vnější teplotu, vnitřní teplotu a vnitřní povrchovou teplotu, obráceně pak pro výpočet vnitřní povrchové teploty je nutné znát vnější teplotu, vnitřní teplotu a teplotní faktor.

Pro zjednodušení výpočtu je k dispozici online kalkulačka těchto hodnot na webové stránce www.tepelnymost.cz.

V ČSN 73 0540-2 jsou dané požadavky na minimální povrchovou teplotu prostřednictvím teplotního faktoru, kdy je v normě uveden vzorec pro výpočet požadovaného teplotního faktoru, a dále je zde uvedena tabulka pro obvyklé teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Pro ostatní prostředí je nutné si provést vlastní výpočet. To se týká např. různých skladovacích prostor, kde je sice nižší teplota, ale často vyšší relativní vlhkost vzduchu. Týká se to ale i místností vytápěných na vyšší teplotu než je 21 °C apod. Protože výpočet je poměrně složitý, je opět na www.tepelnymost.cz online kalkulačka na výpočet minimálního teplotního faktoru.

2.05 Web www.tepelnymost.cz

Jako pomoc projektantům byl zřízen web www.tepelnymost.cz, který se věnuje této problematice. Náhled na tento web je na obr. 8. V sekci vlevo je možné volit vedle prohlížení odborných článků a aktualit kalkulačky přepočítávající faktor teploty na povrchovou teplotu a zpět (odkaz 1), kalkulačky počítající normový požadavek buď na povrchovou teplotu v závislosti na vnitřní a vnější teplotě a vlhkosti, nebo na součinitel prostupu tepla v závislosti na druhu konstrukce a vnitřní a vnější teplotě (odkaz 2).

Největší část webu pak zabírají konkrétní kvantifikované tepelné mosty, které je možné vyhledávat jednoduchým vyhledávačem, pokročilým vyhledávačem či si nechat zobrazit všechny tepelné mosty na webu, kterých je současné době přes 750 (odkaz 3). Zatím nejvíc používané je pokročilé vyhledávání, kde si uživatel může zvolit vždy jednu či více z devíti kategorií. Vyhledávač pak najde všechny detaily odpovídající daným kritériím. Protože však ne všechny detaily obsahují všechny možnosti, může se stát, že tímto výběrem nebude zobrazen žádný detail.

3 Tepelně technické výpočty

3.01 Teplotní pole

Teplotním polem se rozumí prostor, v jehož každém místě je zcela určitá **termodynamická teplota**, za stacionárních podmínek konstantní, za nestacionárních časově proměnná. Teplotní pole je polem skalárním (skalární veličiny mají pouze svou velikost, ale nemají směr) a potenciálním. Termodynamickou teplotou T [K]¹ se rozumí teplota určovaná podle zákonů termodynamiky a lze ji volit za míru kinetické energie pohybujících se molekul (entit).

3.01.1 Rovnice popisující pole

Rovnice popisující rozložení nestacionárního teplotního pole $T(\mathbf{r}, t)$ [K], představující v podstatě zákon zachování energie, který je odvozen z prvního zákona termodynamiky²

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c v \cdot \operatorname{grad} T - w_j, \quad \forall t \geq 0, \quad \text{v oblasti } \Omega,$$

kde	$\lambda(\mathbf{r}, w_v, \rho, T)$	měrná tepelná vodivost [W m ⁻¹ K ⁻¹] ³ ,
	$\mathbf{r}$	polohový vektor [m]
	t	čas [s]
	w_v	objemová vlhkost materiálu [-],
	ρ	pórovitost materiálu [-],
	$\rho(\mathbf{r}, T)$	hustota [kg m ⁻³],
	$c(\mathbf{r}, T)$	měrná tepelná kapacita [J kg ⁻¹ K ⁻¹],
	$\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$	rychlost pohybu kontinua [m s ⁻¹],
	$w_j(\mathbf{r}, T, t)$	vývin tepla v objemové jednotce za jednotku času [W m ⁻³] ⁴ .

¹ Kromě termodynamické teploty vyjadřované v kelvinech – značené T nebo Θ – se používá také Celsiova teplota (značená ϑ) a definována rovnicí $\vartheta = T - 273,15$ a vyjadřovaná v Celsiových stupních °C.

² Záporně vzatý gradient teploty ($-\operatorname{grad} T$) se nazývá **teplotní spád**.

³ Též je možno pracovat s veličinou **měrný tepelný odpor** ρ_s [m K W⁻¹], jež definována vztahem $\rho_s = \frac{1}{\lambda}$.

⁴ Uvažují se zdroje či spotřebiče tepla (nebo jejich kombinace), např. teplo uvolněné či odebrané chemickými reakcemi, hořením, mechanickým namáháním, třením, změnou skupenství, radioaktivním rozpadem částic, měrné Jouleovy ztráty generované elektro-magnetickými poli apod.

Uvažujeme-li, že kontinuum je v klidu, lze zanedbat v rovnici druhý člen na pravé straně; rovnice pak přechází v tzv. rovnici **Fourierovu**⁵

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} - w_d, \quad \forall t \geq 0, \quad \forall \text{ oblasti } \Omega.$$

3.01.2 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky se používají na hranicích Γ nejčastěji ve tvaru

- **Dirichletovy** – nazývané též I. druhu

$$T(\Gamma, t) = T_f(\Gamma, t)$$

Tyto podmínky se aplikují zejména tam, kde je hranice tvořena izotermou.

- **Neumannovy** – nazývané též II. druhu

Tyto podmínky představují bilanci tepelného toku s příslušnou hranicí

$$-\lambda \operatorname{grad} T = q,$$

kde $q(\Gamma, T, t)$ hustota tepelného toku [W m^{-2}].

Homogenní podmínka (tedy $q = 0$) tohoto typu se používá např. při geometrické symetrii.

- **Newtonovy** – nazývané též III. druhu

Tyto podmínky jsou lineární kombinací obou předchozích a zde reprezentují přestup tepla konvekcí do okolního prostředí o teplotě T_{ext} .

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T - T_{\text{ext}}),$$

kde $\alpha(\Gamma, T, t)$ součinitel přestupu tepla z jednoho prostředí do druhého [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$], který může být závislý i na mnoha dalších parametrech prostředí (např. vlhkosti, rychlosti proudění atp.).

Odsud jako speciální případy lze vyjádřit:

zadanou teplotu povrchu $\alpha \rightarrow \infty$,

geometrickou symetrii $\alpha = 0$.

⁵ Zde uvedenou Fourierovu rovnici v homogenním izotropním prostředí lze zapsat do tvaru následující parabolické parciální diferenciální rovnice

$$a \Delta T = \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{w_d}{\rho c}, \quad \forall t \geq 0, \quad \forall \text{ oblasti } \Omega,$$

kde veličina $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] je měrná teplotní vodivost (či součinitel teplotní vodivosti), která slouží jako určité měřítko pro rychlost šíření teploty v určité látce, tedy jak látka „vede teplotu“.

• Ostatní

Při uvažování šíření tepla sáláním (radiací) se uplatňuje větší počet zákonů respektujících tento druh šíření tepla (*Snellův, Lambertův, Stefanův–Boltzmannův, Planckův, Wienův* či *Kirchhoffův*). Okrajové podmínky tohoto typu se též běžně nazývají podmínkami *IV. druhu*.

Zde bude podrobněji uveden pouze zákon Stefanův–Boltzmannův, s kterým je možné se běžně setkat v praxi. Je reprezentován vztahem

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon C (T^4 - T_{\text{ext}}^4),$$

kde ε Stefan–Boltzmannova konstanta (součinitel sálání černého tělesa)

$$\varepsilon = 5,6697 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4},$$

$C(T, t)$ součinitel emisivity ($0 \leq C \leq 1$) [–]

Emisivita tělesa v obecném případě závisí na materiálu tělesa, na vlnové délce λ [μm], úhlu zaměření ϕ (úhlu mezi normálou a osou zaměření) a na kvalitě a stavu povrchu vyzařujícího tělesa.

Poznámka:

Protože při numerických výpočtech je velmi nevýhodné používat čtvrtých mocnin teploty, lze použít v oprávněných případech přibližného řešení, a to tak, že u Newtonovy podmínky se provede korekce součinitele přestupu tepla podle následujícího vztahu

$$\alpha' = \alpha (1 + C).$$

• Periodicity, antiperiodicity

Uvedené okrajové podmínky lze ještě rozšířit na podmínky periodicity či antiperiodicity, které se též někdy nazývají podmínkami zobecněné symetrie a slouží nám ke zjednodušení rozsahu vyšetřované oblasti teplotního pole.

3.01.3 Podmínky na rozhraní

Platí vztahy

$$T_1 = T_2, \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} = q_{\text{vz}},$$

kde $q_{\text{vz}}(T, t)$ hustota „vzniklého“ tepelného toku [W m²]. Příkladem mohou být např. různé chemické reakce (hoření, fázové změny) apod.

3.01.4 Počáteční podmínka

Počáteční podmínka se uvažuje u nestacionárních výpočtů a zadává se nejčastěji ve tvaru

$$T(r, t_{\text{start}}) = T_0(r),$$

kde T_0 představuje hodnotu teploty v daném místě v době začátku vyšetřování teplotního pole [K].

3.02 Obecná problematika vlhkosti

Mnoho materiálů obsahuje jisté množství vzduchových pórů a tepelně izolační schopnosti těchto materiálů jsou silně závislé na poměru objemu vzduchových pórů k objemu materiálu kostry. V praxi je tato situace složitější, neboť kromě množství pórů je rozhodující také jejich velikost, rozmístění, tvar a otevřenost pórového systému. V neposlední řadě každý porézní materiál obsahuje jisté množství vlhkosti, která nahrazuje vzduch. Pro srovnání: vzduch obsažený v pórech s velikostí do průměru 3 mm disponuje hodnotou měrné tepelné vodivosti $\lambda < 0,03 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, oproti tomu voda v klidovém stavu zaujímá hodnotou měrné tepelné vodivosti $\lambda \approx 0,6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, což je zhruba 20krát více!

Zjednodušeně lze hodnotu měrné tepelné vodivosti reálného (stavebního) materiálu vyjádřit na jistém vlhkostním intervalu vztahem:

$$\lambda(w_v, p) = (1-p)\lambda_m + w_v\lambda_w + (p-w_v)\lambda_a,$$

kde: p pórovitost materiálu [–],
 w_v objemová vlhkost materiálu [–],
 λ_m měrná tepelná vodivost materiálu [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$],
 λ_w měrná tepelná vodivost vody [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$],
 λ_a měrná tepelná vodivost vzduchu [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$].

U vlhkosti materiálů se rozlišuje hmotnostní vlhkost w_m [–] a objemová vlhkost w_v [–]. Hmotnostní vlhkost v procentech je dána vztahem

$$w_m = \frac{m_v - m_s}{m_s} 100 \quad [\%]$$

kde m_v hmotnost vlhkého materiálu [kg],
 m_s hmotnost suchého materiálu [kg]

a objemová vlhkost v procentech je dána vztahem

$$w_v = \frac{V_w}{V_s} 100 \quad [\%]$$

kde V_w objem vody [m^3],
 V_s objem suchého materiálu [m^3].

Mezi objemovou a hmotnostní vlhkostí platí vztah

$$w_m = \frac{1000}{\rho_s} w_v, \quad \text{resp.} \quad w_v = 0,001 w_m \rho_s,$$

kde ρ_s hustota materiálu v suchém stavu [kg m^{-3}].

3.03 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost (součinitel tepelné vodivosti) je základní charakteristika, která určuje schopnost materiálu přenášet teplo vedením. Označuje se λ a má rozměr $\text{W}/(\text{m.K})$. S tím, jak ve stavební praxi roste význam co možná nejsprávnějšího definování konstrukce z hlediska jejích tepelně technických vlastností, roste zároveň i význam určení relevantní výpočtové