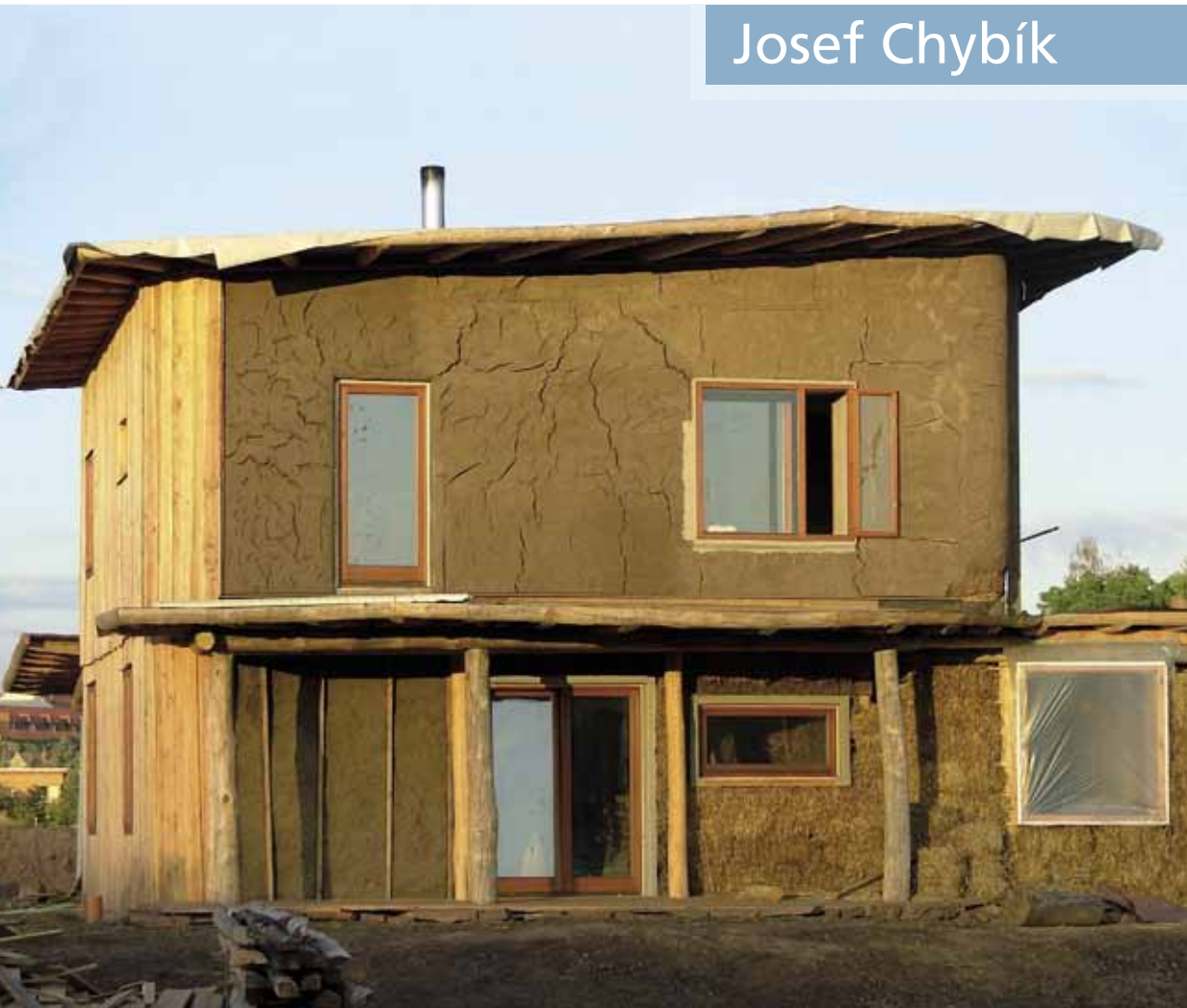


edice stavitel

PŘÍRODNÍ STAVEBNÍ MATERIÁLY

Josef Chybík







PŘÍRODNÍ STAVEBNÍ MATERIÁLY

Josef Chybík

Grada Publishing 2009

Knihu věnuji svým učitelům.

PŘÍRODNÍ STAVEBNÍ MATERIÁLY

Josef Chybík

TIRÁŽ TIŠTĚNÉ PUBLIKACE

Vydala Grada Publishing, a.s.
U Průhonu 22, Praha 7
obchod@grada.cz, www.grada.cz
tel.: +420 220 386 401, fax: +420 220 386 400
jako svou 3771. publikaci
Odpovědná redaktorka Jitka Hrubá
Grafická úprava a sazba Eva Hradiláková
Foto na obálce RIGI, stavební společnost, s.r.o.
Počet stran 272
První vydání, Praha 2009
Vytiskly Tiskárny Havlíčkův Brod, a. s.,
Husova ulice 1881, Havlíčkův Brod
© Grada Publishing, a.s., 2009
Cover Design © Eva Hradiláková, 2009

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

ISBN 978-80-247-2532-1

ELEKTRONICKÁ PUBLIKACE

ISBN 978-80-247-9114-2 (ve formátu pdf)

Obsah

Předmluva	9
Úvod	11
1 Teoretický základ tepelných dějů, akustiky a požární ochrany stavebních konstrukcí	14
1.1 Základní pojmy a veličiny užívané ve stavební tepelné technice	14
1.2 Základní pojmy a veličiny užívané ve stavební akustice	18
1.3 Základní pojmy v požární ochraně budov	19
2 Energetická bilance stavebních materiálů	21
3 Přírodní materiály jako obnovitelné zdroje energie	30
3.1 Sláma jako energetická surovina	32
4 Dříve používané přírodní materiály	35
4.1 Desky z dřevěné vlny a cementu	35
4.2 Dřevotřískové desky	35
4.3 Dřevovláknité desky	36
4.4 Desky Likus	36
4.5 Kůrovinové desky	36
4.6 Desky Empa	36
4.7 Desky z pazdří	36
4.8 Lisované desky Solomit	37
5 Hlína	38
5.1 Historické kořeny stavitelství z nepálené hlíny	38
5.2 Vlastnosti hlíny a výrobků z hlíny	41
5.3 Stabilizace hlíny	44
5.4 Zjišťování vlastností nepáleného materiálu	45
5.5 Přednosti nepálené hlíny	48
5.6 Nedostatky nepálené hlíny	51
5.7 Suroviny	55
5.8 Technologie zpracování hlíny	58
5.9 Tradiční nepálené kusové stavivo	59
5.10 Novodobé kusové stavivo z nepálené hlíny	62
5.11 Války	66
5.12 Hlína dusaná do bednění	67
5.13 Vrstvená nebo také nakládaná hlína, zvaná též lepenice	73
5.14 Hloubené konstrukce	73
5.15 Hlinoslaměné konstrukce v kombinaci se dřevem	74

5.16	Omazávky, mazanice	74
5.17	Mazaniny	75
5.18	Malty na zdění	76
5.19	Přilnavostní – základní nátěry	77
5.20	Hrubé omítky	77
5.21	Jemná hliněná omítka	80
5.22	Příklad použití hlíny v rodinném domě v Čelákovících	87
5.23	Výrobky z jemné hlíny a jílu	90
6	Výrobky z dřevní hmoty	95
6.1	Vlastnosti dřevovláknitých desek	96
6.2	Použití dřevovláknitých desek	99
7	Korek	111
7.1	Vlastnosti korku	112
7.2	Zpracování korku	113
7.3	Použití korku	114
8	Ovčí vlna	116
8.1	Vlastnosti ovčí vlny	116
8.2	Úprava ovčí vlny	116
8.3	Zabudování ovčí vlny	117
8.4	Stavební tepelná izolace z ovčí vlny	119
8.5	Difuzně otevřený systém Diffuwall®	122
9	Konopí	125
9.1	Legislativa k pěstování konopí v ČR	126
9.2	Konopí ve stavebnictví	126
9.3	Bilance CO ₂	128
9.4	Tepelně izolační materiály z konopí	128
9.5	Konopný podlahový systém	132
9.6	Stavba stěny z konopného pazdeří	132
9.7	Konopné pazdeří pro lehčenou maltu a izolační vrstvy	133
9.8	Drť z konopného pazdeří	134
9.9	Konstrukce vnějších stěn s izolacemi z konopí	134
9.10	Konstrukce šikmých střech s izolacemi z konopí	137
9.11	Příčky s izolacemi z konopí	138
9.12	Stropy s izolacemi z konopí	140
9.13	Konopné izolace Canabest	140
10	Len	143
10.1	Zpracování lnu	143
10.2	Vlastnosti výrobků ze lnu	144
10.3	Skladování a manipulace s materiálem	145

10.4	Zabudování materiálu	145
10.5	Použití izolace ze lnu	146
11	Materiály z dovozu	149
11.1	Bavlna	150
11.2	Juta	150
11.3	Kokos	153
11.4	Bambus	155
12	Rákos	161
12.1	Rákos jako nosič omítek	162
12.2	Rákosové desky	162
12.3	Střešní krytina z rákosu	163
12.4	ZOO Jihlava – chýše z přírodních materiálů	169
13	Sláma jako stavební materiál	173
13.1	Historie	174
13.2	Vliv použití slámy na životní prostředí	176
13.3	Vlastnosti slámy	177
13.4	Biotičtí škůdci	187
13.5	Slaměný balík	188
13.6	Konstrukční řešení s využitím slámy	190
13.7	Podlaha se slámou	205
13.8	Omítky použitelné na slaměnou konstrukci	207
13.9	Sláma jako tepelná izolace plochých střech	213
13.10	Sláma jako tepelná izolace šikmých střech	215
13.11	Instalace v konstrukcích ze slámy	217
13.12	Nenosné panely z lisované slámy – ekopanely	218
13.13	Nosné panely z lisované slámy	222
13.14	Příklady domů s použitím slaměných prvků	225
13.15	Sláma jako střešní krytina	242
14	Přírodní materiály k úpravě povrchů	245
14.1	Výrobky na ochranu dřeva	245
14.2	Povrchové úpravy na omítky a zdivo	252
14.3	Povrchová úprava antikorozní kovářskou barvou	257
	Závěr	259
	Literatura	260
	Rejstříky	263

Děkuji všem, kteří jakkoliv přispěli při práci na rukopisu.

Podklady a informace poskytli nebo byli pomocníky při zpracování:

Jan Bareš, Ekopanely CZ, s.r.o. Jedousov; Leoš Boček, FA VUT Brno; Aleš Brotánek, Rožmitál pod Třemšínem; Jaromíra Císařová, Korek Jelínek spol. s r.o. Rychnov u Jablonce nad Nisou; Pavel Deržmíšek, FA VUT Brno; Yvona Gaylliová, Ekologický institut Veronica Brno; Dagmar Glosová, FA VUT Brno; Ladislav Grégr, Claygar s.r.o. Lužice; Daniel Grmela, FAST VUT Brno; Pavla Hesová, IZOLACE KONOPI CZ, s.r.o. Tábor; Boris Hochel, Bratislava (Sk); David Hora, IZOLACE KONOPI CZ, s.r.o. Tábor; Mojmír Hudec, ELAM Brno; Ondřej Chybík, FA VUT Brno; Felix Jeanmarie, Niederbuchsitten (CH); Georg H. Jeitler, Baden bei Wien (A); Max V. Jensen, Svojanov u Bouzova; Felix Jerusalem, Curych (CH); Pavel Klang, Brno; Jana Klimešová, FA VUT Brno; Pavel Koterzyna TRESPOLART, s.r.o. Strunkovice nad Blanicí; Jan Krňanský, Praha; Ladislav Kubů, m.t.a. spol. s r.o. Praha; František Kurtin, ecoShop Brno; Jaroslav

Men, Juta a.s. Turnov; Christian Meyer, Limbach (D); Karel Murtinger, EkoWATT CZ s.r.o. České Budějovice; Michal Navrátil, RIGI, stavební společnost, Hradčany; Pavel Nešťák, Roženec-ké Paseky; Petr Novák, FA VUT Brno; Stefanie Ostermair, GrAT Wien (A); Ivo Štefan, Juteko spol. s r.o. Praha; Tomáš Pešek, Juteko spol.s r.o. Praha; Gabriela Plachá, Kreidezeit Dačice; Lucie Pohanková, FA VUT Brno; Bernard Resch, natur & lehm, Tattendorf (A); Werner Schmidt, Trun (CH); Lukáš Sochor, FAST VUT Brno; Ludvík Trnka, Brno; Marek Vlček, Hliněný dům Lysovice; Kamila Weiglová, FAST VUT Brno.

Zvláště pak děkuji paní doc. Ing. Ivaně Žabičkové, CSc. a panu doc. Ing. Janu Wernerovi, kteří se ochotně a s pečlivostí jim vlastní ujali lektorování. Svými připomínkami, podněty a návrhy přispěli ke zkvalitnění díla.

Josef Chybík

Předmluva

Odklonění od starých výrobních postupů, v nichž se běžně používaly přírodní materiály, začalo s nástupem průmyslové revoluce, která naše území zasáhla na počátku 19. století. Její vliv spustil řetězec proměn s dopadem na urbanizaci a demografickou strukturu země. Projevil se odlivem venkovského obyvatelstva, které jako pracovní síla odcházelo do měst. Zde tito lidé „nasáli“ městský životní styl a pozvolna jej přenášeli do svých venkovských domovů. Námezdní dělníci zvolna opouštěli dovednosti, které se v historickém vývoji s naprostou samozřejmostí při stavbě domů uplatňovaly. Řemeslné techniky děděné generacemi otců a dědů a materiály používané starými staviteli se v překotném vývoji překrývaly moderními způsoby výstavby. Společnost se ocitla na prahu procesů považovaných za stírání rozdílu mezi městem a vesnicí.

Nebyl to však hlavní důvod, který způsobil odchýlení od staletých stavitelských zvyklostí. Na uplatnění materiálů vyráběných průmyslovými metodami měl dominantní vliv především rozvoj dopravních systémů. Trasy železnic a vodních cest byly na našem území dokončeny v podstatě do konce 19. století. Poněkud volnějším tempem se rozšiřovala výstavba zpevněných komunikací a s tím související silniční přeprava. Dalším předělem se stalo období první světové války, které významnou měrou souviselo se začleněním silniční dopravy do běžného života. Najednou přestalo být problematické, aby se na velké vzdálenosti transportovaly hmoty a výrobky. Domácí, s krajinou spjaté materiály se opouštěly. Neodolaly tlaku průmyslové výroby. Objevují se náznaky trendů, charakterizujících odklon od tradičních způsobů výstavby, které se nakonec neudržely ani na našem venkově.

Zásadní význam pro opuštění starých technologií byl vedle dopravy spojen s výrobou a snadnou dostupností oceli, skla a především

s uplatněním cementu. Cement se používal nejen ke stavbě pevnějších základů, svislých a vodorovných konstrukcí. Prostý a vyztužený beton umožnil vytvářet konstrukce větších rozpětí. Ve velké míře se cement uplatnil i pro jednoduché vytváření povrchových úprav. Celá řada nově stavěných i původních domů ztrácela svůj výraz. Fasády se zbavovaly dřívějších výplní otvorů, které nahradila neúměrně velká a nezvykle členěná okna. Bílením nebo hliněnými omítkami upravené stěny ustupovaly sice trvanlivým, ale tuhým a nevzhledným cementovým omítkám. Domy opouštěly své původní funkce. Nejzachovalejší z nich, které si udržely zřetelné stopy těsného vztahu člověka a přírody, nazýváme památkami lidového stavitelství. Jsou reflexí materiálové základny, kterou naši předkové měli k dispozici a dovedli ji využít.

K tomu po druhé světové válce přispělo zprůmyslněné stavebnictví, které spolu s typizací a unifikací, podporující produkci ohromného množství stejných nebo si velmi podobných budov, vedlo ke kvantitativnímu způsobu výstavby. Vše, co vznikalo na prknech architektů a vymykalo se této koncepci, mělo na realizaci buď velmi malou, nebo spíše žádnou naději. Transformovala se řemesla. Například nejhojněji používaný přírodní stavební materiál, kterým je dřevo, se z produkce českých stavebních podniků téměř vytratil. Řemeslníci přestali přebírat zkušenosti, které se dříve předávaly z generace na generaci. Hledaly se nové cesty kosmopolitně nesourodé s tím, co bylo dříve charakteristické pro jednotlivé kraje, města a obce. Z průmyslově vytvářených dílců, postrádajících alespoň náznak přírodní substance, vyrůstaly nové městské části nazývané sídliště.

V projektových pracovištích umrtvovala invence architektů snaha o co nejvyšší produktivitu. Existovaly centrálně řízené ateliéry, kde se v poměrně velké míře pracovalo s opakovatelnými

projekty. Za hranicemi „železné opony“ jsme v polovině 70. let 20. století stáli zcela mimo nastupující proud, který v evropském kontextu přivál první projekty charakteristické konceptem ekologické architektury.

Současné vývojové trendy jsou v obecné rovině úzce spjaty s myšlenkami trvale udržitelného rozvoje. V daleko větší míře, nežli tomu bylo v minulosti, vznikají obavy z vyčerpání surovinových a energetických zdrojů a z nadměrného znečišťování ovzduší. Myšlení stále většího počtu lidí silně ovlivňuje ekologie a snaha o zachování pokud možno co nejčistšího přírodního prostředí. I proto je jedním z důležitých parametrů přírodních materiálů jejich téměř stoprocentní recyklovatelnost. Stále větší důraz se klade na zdravotní nezávadnost materiálů. Uvedené tendence se promítají i do inovací konstrukcí. Pozornost se začíná přesouvat od energeticky náročných technologií k organické materiálové bázi, tzn. přírodním surovinám, které většinu požadavků udržitelného rozvoje splňují.

S nastalou svobodou a možnostmi poznávat, jak se staví v zahraničí, i čeští architekti a stavitelé po roce 1989 odkrývali, kam až dospěly

technologie spojené s použitím přírodních materiálů. S cestami po Evropě získali zkušenosti, do jaké úrovně došla vzdělanost v této oblasti a jak hluboká je naše zaostalost. Díky nevšední otevřenosti zahraničních partnerů jsme mohli začít s transferem poznatků do domácího prostředí. Navzdory mnohemu pozitivnímu jen s obtížemi k nim nalézali cestu nejen stavebníci, ale i projektanti. Přesto se objevili lidé, kteří byli ochotni studovat a poznávat zákonitosti stavitelství založeného na používání tradičních surovin. Nejčastěji však s nimi pracují jen menší, zpravidla specializované stavební podniky, které jsou ochotny je systematicky a plánovitě zařazovat do výrobního programu.

Každá nová stavba, v níž se používají přírodní materiály, byla a stále je sledována širokým okruhem odborníků i veřejnosti. Doprovází je množství pracovních setkání – workshopů, kde si jejich účastníci mohou vlastním přičiněním vyzkoušet stavební postupy. K tomu neodmyslitelně patří rozvoj znalostí o vlastnostech výrobků, které se do stavebního díla zabudovávají. Také tato kniha si vytyčuje za cíl být příspěvkem k tomuto poznání.

Úvod

Termín přírodní materiály není neznámý a můžeme jej nalézt i ve starých normách. Například v ČSN 1168, kterou již v roce 1939 vydala Česká společnost normalizační, jsou stavební materiály rozděleny do dvou skupin, na:

- a) materiály přírodní, které zahrnovaly nejen kámen, kamenné drti, štěrky, písky, hlíny, a dřevo, ale také korek, rákos a dokonce i asfalt,
- b) materiály umělé, kam patřilo vápno, cement, sádra, kamenné omítkové směsi, škvára, dehet, šedá litina a ocel, výrobky z pálené hlíny, také výrobky cementové, sádrové, litinové, ocelové a jiné.

Přírodní stavební materiály v pojetí, které představuje tato kniha, jsou hmoty zpravidla rostlinného nebo živočišného původu. Německy se nazývají „nachwachsende Rohstoffe“, což můžeme přeložit jako dorůstající suroviny. Například se jedná o konopí, korek, len, ovčí vlnu, slámu a další. Proto pozornost nebude věnována hmotám, které jsou také přírodního charakteru, ale pocházejí z oblasti neživé přírody – například různé druhy hornin. Výjimkou bude pouze hlína, která rostlinné produkty velmi často vhodně doplňuje.

Významnou vlastností přírodních materiálů je skutečnost, že mají příznivý vliv jak na lidské smysly, tak i na zdravé životní prostředí. Mnoho lidí trpí alergiemi a zdravotními indispozicemi, které jsou vyvolány látkami zabudovanými do konstrukcí. Hmoty, které vytvářejí obytný a pracovní prostor a jsou z přírodních materiálů, dokáží být příspěvkem k potlačení nebo úplnému odstranění těchto těžkostí. Dovedou například dobře regulovat vlhkost vzduchu ve vnitřním prostředí. Mají charakteristickou vůni, která blahodárně působí na lidské vědomí. Vizualní kontakt nebo dotyk ruky dokáže vyvolat příjemné pocity a zprostředkovat člověku dobrou náladu. Použitím materiálů

a konstrukcí realizovaných podle zásad zdravotní nezávadnosti se předejde mnohým chorobám, které se například mohou projevovat poklesem imunitních schopností organismu, rozvojem různých forem alergií, v krajních případech vznikem karcinomů. V této souvislosti probíhá světový výzkum, který se zabývá studiem vlivu budov na zdraví. Ubírá se několika směry:

- "Indoor Air Pollution" (IAP) se zabývá negativním působením škodlivin z fyzikálního, chemického i biologického hlediska.
- "Sick Building Syndrome" (SBS) – syndromem nemocných budov se nazývá negativní ovlivnění zdraví člověka v budovách, jehož původ a souvislost s budovou zatím nedokážeme prokázat.
- "Building Related Illness" (BRI) jsou choroby, které mají prokazatelně původ v samotné budově.

Příroda produkuje velké množství surovin, které je možno použít ve výstavbě, mnohdy s jen velmi malým energetickým vkladem. Jsou anorganického původu, jako je hlína nebo kámen, rostlinného původu, ke kterým můžeme zařadit dřevo, konopí, korek, len, slámu, rákos, bambus, anebo původu živočišného, jako je ovčí vlna. Podle využití se dělí do tří kategorií – na konstrukční, izolační a doplňkové (Nagy 2004).

- a) Konstrukční materiály slouží k vytváření nosných konstrukcí. Zde se nejlépe uplatňují například kámen, dřevo, lisovaná sláma, nepálená hlína ve formě cihel, dusaná hlína, slaměné balíky nebo exotický bambus.
- b) Izolační materiály slouží pro tepelné izolování obvodových plášťů budov, zvukovou izolaci podlah a akustické obklady. Patří sem například bavlna, celulóza, konopí, len, rákos, ovčí vlna, sláma, výrobky z dřevěných vláken a korku.

c) K doplňkovým materiálům se řadí nátěry z přírodních látek, linoleum, podlahoviny z korku, tkaniny z juty, tkaniny z kokosových vláken, tkaniny a tapety z ovčí vlny nebo též omítky.

K výstavbě budov se po dlouhá staletí používaly především místní materiály. Zpravidla se jednalo o suroviny, které se daly vytěžit nebo vyprodukovat přímo v místě stavby. Často to byla hlína, kámen a hmoty pocházející z rostlin. Tak známe území, která jsou označována jako zóny a styčné oblasti s výskytem podunajského hliněného a kamenného domu, západoevropského hrázděného domu, českého a moravského roubeného domu nebo alpského dřevěného domu v Pošumaví (*Mencl 1980*). Stavby se realizovaly podle generacemi osvědčených archetypů, podpořených tradičními a staletými prověřenými technologiemi. Nejen na venkově, ale i ve městech vznikaly soubory staveb v harmonickém souladu s krajinou, přitom vyhovující životnímu stylu jejich tvůrců. V současnosti se na tuto poněkud pozapomenutou tradici navazuje. Ve stavebních realizacích se opět objevují komponenty, které jsou produktem zemědělské výroby. Patří k nim například sláma. Jejich příznivé užitné vlastnosti jim například dovolují, aby se staly surovinou do zateplovacích systémů a střešních krytin.

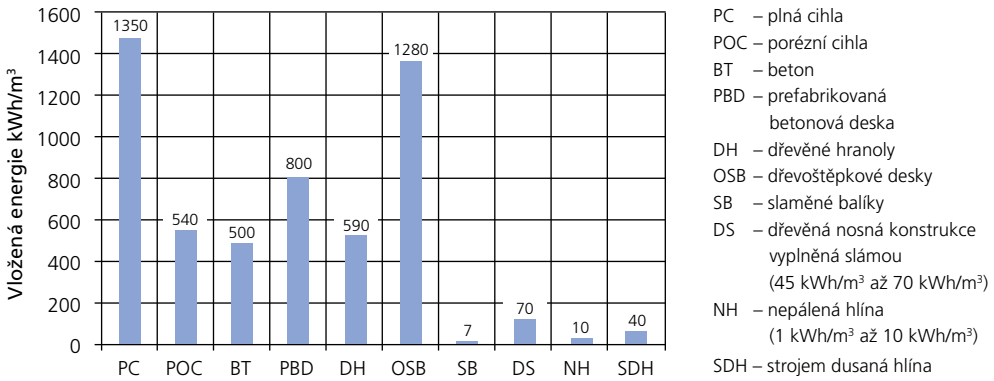
Po druhé světové válce nastalo období, kdy do stavebnictví vstoupila do té doby nevídaným způsobem chemická výroba. Její produkty jsou levnější než celá řada tradičních materiálů. Stačí s různými přírodními výrobky porovnat tepelné izolanty z pěnového polystyrénu. Jejich nízká cena však neobsahuje náklady nutné na recyklaci, což se stává zátěží odloženou budoucím generacím. Otázkou však zůstává, zda je vhodné aplikace hmot z neobnovitelných ropných zdrojů stále rozvíjet. Zvláště když existuje velké množství obnovitelných surovin, které dokáží synteticky vyráběný produkt nahradit a ropu i z hlediska perspektiv dalšího rozvoje ponechat pro vhodnější použití, za které můžeme například považovat produkci ušlechtlejších komodit, jako jsou

léky. Přitom je potřeba si uvědomit značné závislosti na producentech suroviny, která je obtížně a mnohdy s průvodním jevem ekologických katastrof dobývána, přepravována a zpracována. Navíc se zpravidla nachází v politicky nestabilních teritoriích. Příkladem mohou být zkušenosti získané z energetické krize, která nastala v roce 1973. I současnost je prodchnuta trendem stoupajících nebo kolísajících cen ropy, zemního plynu, uhlí i elektřiny. Tíživé zkušenosti byly získány při několikátýdenním kolapsu v dodávce zemního plynu, který Evropu postihl na počátku roku 2009. To vše posiluje přesvědčení o použití nezávislých alternativních energetických a surovinových zdrojů.

Nejen v mnoha evropských zemích, ale i u nás již v současnosti existuje množství příkladů, ve kterých se optimálně využívá konstrukčních vlastností hlíny a tepelně izolační schopnosti slámy, lněných nebo konopných vláken. Aktuální veličinou je přitom potřeba energie na jejich výrobu. Podle míry při výrobě vložené energie lze provést porovnání několika vybraných surovin a konstrukcí (*Minke 2008*), *obrázek 1*. Nejhůře vycházejí plné cihly s 1350 kWh/m³. Porézní cihly oproti cihlám plným potřebují pouze 40 %, beton 37 % energie. Možná překvapivě vynívají desky OSB s 95 %. Slaměné balíky mají proti plným cihlám pouze 5% podíl vložené energie.

Přírodní materiály uplatněné ve výstavbě jsou zdravotně nezávadné hmoty. Oproti produktům vyráběným z ropy jsou charakteristické také tím, že na konci životnosti se dají snadno recyklovat. Velmi úspěšné je dřevo, které jako dorůstající obnovitelný materiál kumuluje ve své rostlinné struktuře CO₂.

Environmentálně šetrný přístup se řídí teoreticky zdůvodněnými a praxí ověřenými principy, které preferují přírodní materiály z obnovitelných a recyklovatelných surovin (*Pifko & Špaček et al. 2008*). Zatížení dopravou může ve velké míře snížit využívání místních zdrojů. I přírodní materiály se mohou stát málo vhodnými, pokud budou přepravovány po dlouhých trasách. Například převážení slámy na velké vzdálenosti může



Obr. 1 Energie vložená do zpracování stavebních materiálů (Minke 2008)

tento zajímavý a kvalitní přírodní produkt posunout až za hranici použitelnosti. Zcela se tak poruší princip o úspornosti, který by měl platit u materiálů vyrobených s minimální energetickou náročností.

V energetické optimalizaci budov je vhodnou alternativou realizace pasivních domů s použitím přírodních materiálů. To lze tvrdit i přes skutečnost, že z hlediska pořizovacích – investičních nákladů je průměrná cena těchto objektů přibližně o 8 % až 12 % vyšší. K běžnému provozu takové budovy je však potřebné pouze 10 % energie oproti domům stavěným podle současných požadavků.

V Evropě již bylo realizováno množství nových moderních domů, v nichž jsou použity přírodní materiály a přitom dosahují velmi nízké spotřeby. Příkladem může být administrativní objekt firmy Natur&Lehm v Tattendorfu s použitím slámy a hlíny nebo S-Haus v Böheimkirchenu. Důslednost při výstavbě v Böheimkirchenu byla dovedena až k výrobě nábytku z lisované slámy. Obě stavby vykazují vynikající energetické výsledky, které je řadí ke špičkovým dílům v kategorii pasivních domů. Takovéto domy významnou měrou přispívají ke snížení zatížení životního prostředí. Příspěvkem může být ještě případné

použití paliva získaného z rostlin. Například dům v Tattendorfu je v období s nejnižšími teplotami vytápěn bioethanolem. Zajímavou stavbou je také rodinný dům ve švýcarském Eschenz (Chybík 2008), jehož realizace se uskutečnila z panelů vyrobených z lisované slámy. V České republice je obdobným pasivním domem Centrum ekologických aktivit v Hostětíně.

S tématy přírodních domů se rozvíjí i mezinárodní spolupráce. Řada našich zájemců o přírodní stavitelství vyjíždí do zemí, kde je tento typ výstavby na pokročilé technologické úrovni. Z poslední doby můžeme vzpomenout návštěvu slovenských stavitelů u Švýcara Wernera Schmidta, který je znám jedinečnými stavbami z nosné slámy. Studenti se svými učiteli vyjíždějí do Rakouska. Také do České republiky a na Slovensko přichází řada známých odborníků. Můžeme uvést vystoupení německého profesora Gernota Minkeho v Bratislavě (2008) a v Brně (2009), úspěšný návrh a realizaci profesora Georga W. Reinberga v Hostětíně, přednášku architekta Felixe Jerusalema (2008) a Wernera Schmidta (2009) v Brně nebo praktické ukázky stavitele Toma Rijvena na několika workshopech v Hradčanech u Tišnova (2007).

1 Teoretický základ tepelných dějů, akustiky a požární ochrany stavebních konstrukcí

K přiblížení pojmů, které jsou v dalších kapitolách používány, je přiložen krátký komentář. Budou definovány základní matematické vztahy, které se při popisu vlastností materiálů ve stavební tepelné technice, akustice a požární ochraně uplatňují nejčastěji. Také budou uvedeny fyzikální jednotky užitých veličin.

1.1 Základní pojmy a veličiny užívané ve stavební tepelné technice

Teplo (Q) je energie dodávaná v důsledku rozdílu teplot. Energii lze dodávat též konáním práce a přenosem hmoty. Příspěvek dodaný teplem není v energii soustavy rozlišitelný od příspěvků dodaných jinými způsoby: pojem tepelná energie, který se velmi často používá, nemá proto smysl (Zemansky 1957), (Chybík 2005). Jednotkou je $J = m^2kg/s^2$.

Tepelný stav dané látky vyjadřuje **teplota**. Rozlišujeme:

- termodynamickou teplotu,
- *Celsiovu* teplotu.

Termodynamická teplota (T) je definována druhou větou termodynamiky a přiřazením 273,16 K teplotě trojného bodu vody, což je směs ledu, vody a vodní páry.

Celsiova teplota (t) je definována vztahem:

$$\theta = T - 273,15$$

kde θ je *Celsiova* teplota ve $^{\circ}C$ (stupních Celsia),
 T termodynamická teplota v K (Kelvinech).

Teplota trojného bodu vody je 273,16 K a 0,01 $^{\circ}C$. Teplota bodu mrazu je 0,00 $^{\circ}C$ a 273,15 K. Rozdíly teplot vyjádřené ve $^{\circ}C$ a v K jsou číselně přesně stejné, to znamená, že 1 $^{\circ}C$ je přesně roven 1 K.

V anglosaských zemích se ještě používá **stupnice Farenheitova**. Jejimi fixními body jsou 32 $^{\circ}F$ (0 $^{\circ}C$) a 212 $^{\circ}F$ (100 $^{\circ}C$). Vztah ke stupnici *Celsiově* se dá vyjádřit rovnicí:

$$\theta_f = \frac{9}{5} \cdot \theta + 32$$

kde θ_f je teplota ve $^{\circ}F$,
 θ teplota ve $^{\circ}C$.

Tepelná kapacita (K_x) vyjadřuje schopnost tělesa nebo soustavy přijímat teplo. Tepelná kapacita je teplo potřebné k ohřátí daného tělesa o jeden stupeň (1 K nebo 1 $^{\circ}C$).

Je definována podílem přivedeného tepla a příslušné změny teploty:

$$K_x = \frac{dQ}{dT}$$

kde K_x je tepelná kapacita v $J/K = m^2 \cdot kg/(s^2 \cdot K)$,
 dQ přivedené teplo v J,
 dT přírůstek teploty v K způsobený přivedeným teplem.

Měrná tepelná kapacita (c) je teplo potřebné k ohřátí jednotky hmotnosti (1 kg) dané látky o jeden stupeň (1 K nebo 1 °C). Je definována podílem tepelné kapacity K_x a hmotnosti m zkoumaného množství látky:

$$c = \frac{K_x}{m} = \frac{1}{m} \cdot \left(\frac{dQ}{dT} \right)$$

kde c je měrná tepelná kapacita v $J/(kg \cdot K) = m^2/(s^2 \cdot K)$,

K_x tepelná kapacita v $J/K = m^2 \cdot kg/(s^2 \cdot K)$,

m hmotnost látky v kg,

Q přivedené teplo v J,

T teplota v K.

Absolutní vlhkost daného vzduchu (ϕ) vyjadřuje hmotnost vodní páry obsažené v jednotce objemu (1 m³) tohoto vzduchu. Vyjadřuje se vztahem:

$$\phi = \frac{m_v}{V}$$

kde ϕ je absolutní vlhkost vzduchu v kg/m^3 ,

m_v hmotnost vodní páry v kg,

V objem vzduchu v m³.

Relativní vlhkost daného vzduchu (φ) je poměr hmotnosti vodní páry obsažené ve vzduchu ku hmotnosti nasycené vodní páry stejného objemu a teploty. Může se vyjádřit vztahem:

$$\varphi = \frac{\phi}{\phi_n} \cdot 100 = \frac{p}{p_n} \cdot 100$$

kde φ je relativní vlhkost vzduchu v %,

ϕ absolutní vlhkost vzduchu v kg/m^3 ,

ϕ_n absolutní vlhkost párou nasyceného vzduchu v kg/m^3 ,

p parciální tlak vodní páry v daném vzduchu v Pa,

p_n parciální tlak nasycené vodní páry v daném vzduchu v Pa.

Tepelný tok (l_Q) je teplo dodané za jednotku času. Je definován podílem přenášeného tepla a příslušného času:

$$l_Q = \frac{dQ}{d\tau}$$

kde l_Q je tepelný tok v $J/s = W = m^2 \cdot kg/s^3$,
 dQ dodané teplo v J,
 $d\tau$ za čas $d\tau$ v s.

Hustota tepelného toku (q) vyjadřuje tepelný tok připadající na jednotku plochy (1 m²) postavenou kolmo ke směru šíření tepla. Je definována podílem tepelného toku a plochy, jíž tento tok kolmo prochází:

$$q = \frac{dl_Q}{dS}$$

kde q je hustota tepelného toku ve $W/m^2 = kg/s^3$,

dl_Q tepelný tok v $J/s = W = m^2 \cdot kg/s^3$,
 dS plocha v m².

Teplotní gradient (spád) je teplotní rozdíl, připadající na jednotkovou vzdálenost (1 m):

$$\frac{\Delta T}{\Delta x}, \text{ (obecně grad } T)$$

kde ΔT je teplotní rozdíl v K nebo °C připadající na vzdálenost Δx .

Tepelná vodivost (λ) vyjadřuje schopnost látky vést teplo. Tepelná vodivost daného materiálu je hustota tepelného toku při jednotkovém teplotním gradientu. Hustota tepelného toku při daném teplotním gradientu $\Delta T/\Delta x$ pak je:

$$q = -\lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}, \text{ (obecně } q = -\lambda \cdot \text{grad } T)$$

(znaménko minus vyjadřuje, že tepelný tok je kladný, když je gradient záporný)

kde q je hustota tepelného toku ve $W/m^2 = kg/s^3$,

λ součinitel tepelné vodivosti ve $W/(m \cdot K) = m \cdot kg/(s^3 \cdot K)$,

$\Delta T/\Delta x$ teplotní gradient v K/m,
 Δx jednotková vzdálenost v m.

Tepelná propustnost daného materiálu (Λ) je hustota tepelného toku při jednotkovém teplotním rozdílu. Hustota tepelného toku při daném teplotním rozdílu ΔT pak je:

$$q = \Lambda \cdot \Delta T$$

Tepelná propustnost je tepelná vodivost, připadající na jednotkovou vzdálenost (například jednotkovou tloušťku materiálu):

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\Delta x}$$

kde q je hustota tepelného toku ve $W/m^2 = kg/s^3$,
 Λ plošná tepelná vodivost ve $W/(m^2 \cdot K) = kg/(s^3 \cdot K)$,
 T teplota v K,
 λ součinitel tepelné vodivosti ve $W/(m \cdot K) = m \cdot kg/(s^3 \cdot K)$,

Tepelná jímavost (b) vyjadřuje schopnost materiálu o definované vlhkosti přijímat teplo: Je vyjadřována vztahem:

$$b = \lambda \cdot c \cdot \rho$$

kde b je tepelná jímavost ve $W^2 \cdot s/(m^4 \cdot K^2)$,
 λ součinitel tepelné vodivosti ve $W/(m \cdot K) = m \cdot kg/(s^3 \cdot K)$,
 c měrná tepelná kapacita v $J/(kg \cdot K)$,
 ρ objemová hmotnost v kg/m^3 .

Tepelná pohltivost (s) je schopnost materiálu pohlcovat teplo nebo teplo uvolňovat. Definuje se vztahem:

$$s = \sqrt{\left(2 \cdot \frac{\pi}{T}\right) \cdot b}$$

kde s je tepelná pohltivost ve $W/(m^2 \cdot K)$,
 b tepelná jímavost ve $W^2 \cdot s/(m^4 \cdot K^2)$,
 T vhodně zvolená doba kmitu v s.

Součinitel přestupu tepla (h) vyjadřuje sdílení tepla mezi tekutinou (plynem nebo kapalinou) a tuhou stěnou. Je roven hustotě tepelného toku mezi tekutinou a stěnou při jednotkovém teplotním rozdílu mezi nimi. Hustota tepelného toku při daném teplotním rozdílu pak je:

$$q_i = h_{si} \cdot (\theta_{ai} - \theta_{si}), \quad q_e = h_{se} \cdot (\theta_{ae} - \theta_{se})$$

kde h_{si}, h_{se} je součinitel přestupu tepla na vnitřní a vnější straně konstrukce ve $W/(m^2 \cdot K)$,
 q hustota tepelného toku mezi tekutinou a stěnou ve W/m^2 ,
 θ_{ai} teplota vnitřního vzduchu ve $^{\circ}C$,
 θ_{ae} teplota vnějšího vzduchu ve $^{\circ}C$,
 θ_{si} teplota na vnitřním povrchu konstrukce ve $^{\circ}C$,
 θ_{se} teplota na vnějším povrchu konstrukce ve $^{\circ}C$.

Součinitel přestupu tepla α závisí na vlastnostech tekutiny a na zakřivení a náklonu stěny. Tento součinitel je obtížné určit, poněvadž se mění v širokých mezích v závislosti na druhu proudění, viz *tabulka 1.1*. Výpočtem stanovený součinitel přestupu tepla se jen výjimečně shoduje s hodnotami získanými experimentální cestou.

Tab. 1.1 Součinitel přestupu tepla pro různé druhy prostředí (Mrlík 1993)

Prostředí	Součinitel přestupu tepla h_s [$W/(m^2 \cdot K)$]
Klidný vzduch	3,5 až 12,0
Proudící vzduch	12,0 až 580,0
Proudící kapalina	230,0 až 5800,0
Vroucí kapalina	4600,0 až 7000,0
Kondenzující vodní páry	8100,0 až 14000,0

Tab. 1.2 Požadované a doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla podle ČSN 73 0540-2:2007

Pol.	Popis konstrukce	Požadované hodnoty U [W/(m ² ·K)]	Doporučené hodnoty U [W/(m ² ·K)]	Pasivní domy U [W/(m ² ·K)]
1	Střecha plochá a šikmá se sklonem < 45°	0,24	0,16	0,12
2	Strop pod nevytápěnou půdou	0,30	0,20	
3	Stěna vnější ve vytápěném prostoru	0,30	0,20	0,15
4	Střecha strmá se sklonem > 45° lehká	0,30	0,20	
5	Střecha strmá se sklonem > 45° těžká	0,38	0,25	
6	Podlaha a stěna vytápěného prostoru přilehlá k zemině	0,45	0,30	

Součinitel prostupu tepla (U) vyjadřuje sdílení tepla mezi dvěma tekutinami oddělenými tuhou stěnou (nebo mezi tekutinou a stěnou, jsou-li odděleny izolační vrstvou). Je roven hustotě tepelného toku při jednotkovém rozdílu teplot mezi uvažovanými tekutinami. Tepelný tok při daném teplotním rozdílu pak je:

$$q = U \cdot (\theta_{ai} - \theta_{ae})$$

a součinitel prostupu tepla má tvar:

$$U = \frac{q}{(\theta_{ai} - \theta_{ae})}$$

kde U je součinitel prostupu tepla

ve W/(m²·K) = kg/(s³·K),

q hustota tepelného toku

ve W/m² = kg/s³,

θ_{ai} teplota vnitřního vzduchu ve °C,

θ_{ae} teplota vnějšího vzduchu ve °C.

V aplikacích uplatňovaných ve stavební tepelné technice je součinitel prostupu tepla vyjádřen vztahem:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{\frac{1}{h_{si}} + \sum_{k=1}^n \frac{d_k}{\lambda_k} + \frac{1}{h_{se}}}$$

kde U je součinitel prostupu tepla ve W/(m²·K) = kg/(s³·K),
 R_T tepelný odpor při prostupu tepla v m²·K/W,
 h_{si} součinitel přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce ve W/(m²·K) = kg/(s³·K),
 h_{se} součinitel přestupu tepla na vnější straně konstrukce ve W/(m²·K) = kg/(s³·K),
 d_k tloušťka k-té vrstvy stavební konstrukce v m,
 λ_k tepelná vodivost k-té vrstvy stavební konstrukce ve W/(m·K) = m·kg/(s³·K).

Kritéria

Kritéria součinitelů prostupu tepla definuje ČSN 73 0540:2007. Rozlišuje hodnoty požadované a doporučené. V pokynech pro navrhování uvádí také parametry pro budovy s velmi nízkou energetickou náročností. V *tabulce 1.2* jsou uvedeny hodnoty součinitelů prostupu tepla vybraných konstrukcí.

1.2 Základní pojmy a veličiny užívané ve stavební akustice

Rozsah slyšení se u zdravého člověka pohybuje v rozmezí od $f = 16$ Hz až 20 Hz a končí mezi $f = 16$ KHz až 20 KHz. Vysokou citlivost vykazuje sluch v oblasti středních frekvencí, přibližně mezi $f = 0,50$ kHz až 5,0 kHz. Mezi $f = 0,50$ kHz až 2,00 kHz se nacházejí kmitočty, které jsou důležité pro poslech řeči. Směrem k nízkým kmitočtům se citlivost sluchu výrazně snižuje. Kmitočty nižší než $f = 16$ Hz definují oblast nazývanou infrazvukem. Zvuky o kmitočtu vyšším než $f = 20$ kHz jsou ultrazvukem.

Zvukově izolační vlastnosti dělicích prvků vzhledem ke zvukům, které se šíří vzduchem, jsou charakterizovány neprůzvučností R . Jsou dány vztahem:

$$R = \log \frac{W_1}{W_2}$$

kde W_1 je akustický výkon dopadající na dělicí prvek ve W ,
 W_2 akustický výkon vyzářený zkoušeným dělicím prvkem ve W .

Hladina akustického tlaku L se vyjadřuje jako podíl akustického tlaku p k referenční hodnotě akustického tlaku:

$$L = 20 \log \frac{p}{p_0}$$

kde p je akustický tlak v Pa,
 p_0 referenční hodnota akustického tlaku $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Pro stavební materiály je důležitou vlastností schopnost pohlcovat zvuk. Vyjadřuje se činitelem zvukové pohltivosti jako poměr zvuku pohlceného plochou W_a ke zvuku dopadajícímu na plochu W_i :

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i}$$

Pohlčený zvuk je rozdílem energie zvuku dopadajícího W_i a odražené složky W_r :

$$W_a = W_i - W_r$$

kde W_a je energie zvuku pohlceného plochou ve W ,
 W_i energie zvuku dopadajícího na plochu ve W ,
 W_r energie zvuku od plochy odraženého ve W .

Pohltivost povrchů A se udává vztahem:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i$$

kde α_i je číselný koeficient zvukové pohltivosti materiálu, udávaný pro oktaóvové intervaly v kmitočtech od $f = 125$ Hz do 4000 Hz, popř. 8000 Hz,
 S_i plocha materiálu v m^2 .

Pro orientační informaci o zvukové pohltivosti materiálů se v praxi používá střední hodnota činitele pohltivosti, zjištěná jako průměr z hodnot přiřazených ke kmitočtům $f = 250, 500, 1000$ a 2000 Hz. Tato hodnota se také nazývá NOISE REDUCTION COEFFICIENT a označuje se NRC:

$$NRC = \frac{(\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000})}{4}$$

Požadavky na konstrukce

Na stavební konstrukce příček a stěn mezi místnostmi v budovách jsou v ČSN 73 0532:2000 stanoveny hodnoty, které se určí podle ČSN EN ISO 717-1 z veličin v třetinooktaóvových kmitočtových pásmech definovaných v ČSN EN ISO 140-4.