Difúze vodní páry a její kondenzace uvnitř konstrukcí

Zbyněk Svoboda, FSv ČVUT

Původní text ze skript „Stavební fyzika 31“ z roku 2004. Částečně aktualizováno v roce 2014 především s ohledem na změny v normách.

Hodnocení šíření vodní páry konstrukcí je jednou z velmi důležitých úloh stavební tepelné techniky. Slouží k ověření charakteru dlouhodobého tepelně vlhkostního chování konstrukce.

1.1. Požadavky

Norma ČSN 73 0540-2 v čl. 6.1.1 požaduje, aby byly **bez kondenzace** vodní páry uvnitř konstrukce navrženy všechny konstrukce, u kterých by zkondenzovaná vodní pára ohrozila jejich požadovanou funkci[1]. Splnění tohoto požadavku se prokazuje výpočtem s použitím návrhové venkovní teploty a návrhové teploty a vlhkosti vnitřního vzduchu.

U ostatních konstrukcí je podle čl. 6.1.2 v ČSN 73 0540-2 **kondenzace** vodní páry uvnitř skladby **přípustná**, pokud jsou splněny následující podmínky:

- zkondenzovaná vodní pára **neohrozí požadovanou funkci** konstrukce
- ve stavební konstrukci nesmí v roční bilanci kondenzace a vypařování zbýt žádné zkondenzované množství vodní páry $\boldsymbol{M_{c,a}}$, které by zvyšovalo vlhkost konstrukce (tj. na konci modelového roku musí platit $\boldsymbol{M_{c,a} = 0\ \mathrm{kg/m^2}}$)
- roční množství zkondenzované vodní páry $\boldsymbol{M_{c,a}}$ musí být nižší než limit $\boldsymbol{M_{c,a,N}}$, který činí:
  - $\boldsymbol{M_{c,a,N} = 0{,}10\ \mathrm{kg/(m^2.a)}}$ nebo **3 %** plošné hmotnosti materiálu, v němž dochází ke kondenzaci (nižší z hodnot) pro jednoplášťové střechy, pro konstrukce s dřevěnými prvky, pro konstrukce s kontaktním zateplením a pro další konstrukce s málo propustnými vnějšími vrstvami
  - $\boldsymbol{M_{c,a,N} = 0{,}50\ \mathrm{kg/(m^2.a)}}$ nebo **5 %** plošné hmotnosti materiálu, v němž dochází ke kondenzaci (nižší z hodnot) pro ostatní stavební konstrukce.

  Limitní hodnoty 3 či 5 % plošné hmotnosti přitom platí pro materiály s objemovou hmotností nad 100 kg/m^3. Je-li objemová hmotnost materiálu, v němž dochází ke kondenzaci, nižší nebo rovna 100 kg/m^3, použijí se dvojnásobné hodnoty, tj. **6 %** nebo **10 %**.

Výše uvedené požadavky se přitom posuzují pro vnitřní i vnější konstrukce s výjimkou konstrukcí přilehlých k zemině. Pro ně se standardně hodnocení šíření vodní páry neprovádí s výjimkou ověření samotného rizika vzniku kondenzace vodní páry při venkovní návrhové teplotě (potřebné především pro podlahy se zabudovanými dřevěnými prvky).

U **dvouplášťových konstrukcí** se výše uvedené požadavky vztahují na vnitřní plášť. Navíc musí podle čl. 6.4 relativní vlhkost vzduchu proudícího ve větrané vzduchové vrstvě po celé její délce splňovat i za bezvětří podmínku

$$\varphi_{cv} < 90\,\%. \qquad [\%] \qquad (1)$$

[1] Za ohrožení funkce konstrukce se považuje zkrácení její životnosti, objemové změny materiálů, výrazné zvýšení hmotnosti či takové zvýšení vlhkosti materiálů, které by způsobovalo jejich degradaci. Pozor je třeba dát především na materiály organického původu (např. dřevo, papír).

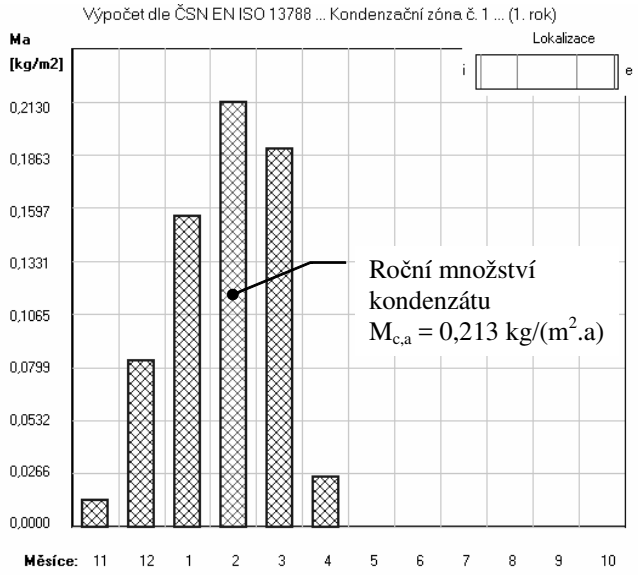
1.2. Postup výpočtu

1.2.1. Ověření výskytu kondenzace ve skladbě konstrukce

Při posouzení šíření vodní páry konstrukcí je nejprve třeba zjistit, zda v konstrukci dochází či nedochází v zimním období ke kondenzaci vodní páry. Tento výpočet se provádí s pomocí tradiční Glaserovy metody, jejíž popis najde laskavý čtenář v ČSN 73 0540-4 a v celé řadě publikací[2]. Důležité je, že se v tomto výpočtu používají **návrhové okrajové podmínky** (tj. návrhová venkovní teplota a relativní vlhkost a návrhová teplota a relativní vlhkost vnitřního vzduchu – viz část **Okrajové podmínky**). V zásadě se posuzuje jen jeden výpočtový stav charakterizovaný velmi nízkou venkovní teplotou (-12 až -21 °C). Výsledkem tohoto kroku je buď prokázání, že konstrukce kondenzací v zimním období ohrožena není, nebo stanovení konkrétní kondenzační zóny (či zón) a aktuální míry kondenzace v kg/(m^2.s).

1.2.2. Roční bilance zkondenzované a vypařené vodní páry

Roční bilance zkondenzované a vypařené vodní páry se standardně provádí bilančním výpočtem po měsících podle ČSN EN ISO 13788. Pouze v případě, kdy nejsou k dispozici potřebné klimatické údaje, připouští ČSN 73 0540-2, aby byl výpočet roční bilance vodní páry proveden tradičním postupem podle ČSN 73 0540-4[3]. Ať se použije postup kterékoli z uvedených norem, je výsledkem výpočtu vždy soubor údajů, které zjednodušeně charakterizují vlhkostní chování konstrukce v čase.



Obr. 1 *Obsah kondenzátu v konstrukci během roku*

Výpočtem podle evropské normy lze získat **množství kondenzátu** v dílčích kondenzačních zónách **na konci jednotlivých měsíců** v roce – lze tedy velice názorně sledovat, jak se obsah kondenzátu v konstrukci během zimních měsíců zvyšuje a jak zas během jara a léta klesá (Obr. 1).

Výpočtem podle ČSN 730540-4 lze získat pouze dvě hodnoty, které časově proměnné chování konstrukce shrnují. Jde o **roční množství zkondenzované vodní páry** a o roční množství

---

[2] Pro rychlé připomenutí: zmíněná metoda vychází z porovnání teoretického průběhu částečných tlaků vodní páry p a průběhu částečných tlaků nasycené vodní páry p_{sat}. Je-li křivka $p \geq p_{sat}$., dochází v konstrukci ke kondenzaci a kondenzační zóna se nalezne s pomocí tečen z koncových bodů přímky p ke křivce p_{sat}.

[3] Je-li to možné, je vždy lepší provést výpočet roční bilance oběma možnými metodikami. Výsledky postupu podle ČSN EN ISO 13788 a podle ČSN 730540-4 se totiž často liší. Vyjde-li hodnocená konstrukce jako vyhovující při použití obou výpočetních metodik, je její návrh skutečně spolehlivě ověřen.

odpařitelné vodní páry (kapacitu odparu). Z jejich porovnání lze pak usuzovat, zda se v zimě vzniklý kondenzát může přes teplejší měsíce odpařit či nikoliv.

Výpočet difúze vodní páry a její roční bilance je poměrně náročný, a to především v případě manuálního zpracování. Standardem se proto již před řadou let stalo provádění tohoto výpočtu s pomocí **specializovaných programů**.

Závěrem této kapitoly se ještě podívejme poněkud podrobněji na metodiku roční bilance podle ČSN EN ISO 13788. Výpočet je opět založen na Glaserově metodě. Zásadně odlišně od tradičního postupu podle ČSN 730540-4 jsou ovšem do výpočtu zaváděny okrajové podmínky. Zatímco v metodice ČSN 730540-4 se hodnocení konstrukce provádí pro postupně se zvyšující vnější teploty[4], metodika ČSN EN ISO 13788 předepisuje výpočet **po jednotlivých měsících** s použitím **průměrných měsíčních teplot a vlhkostí** vnějšího vzduchu. Odlišnosti v okrajových podmínkách se ale netýkají pouze exteriéru. Metodika ČSN EN ISO 13788 umožňuje také zavést do výpočtu pro každý hodnocený měsíc odlišnou průměrnou teplotu a vlhkost vnitřního vzduchu, což při použití standardního postupu podle ČSN 730540-4 není možné. Pro relativní vlhkost vnitřního vzduchu podporuje ČSN EN ISO 13788 navíc trojí způsob jejího stanovení (podrobněji v části **Okrajové podmínky**). Změny v zavádění okrajových podmínek do výpočtu podle ČSN EN ISO 13788 lze celkově hodnotit jako krok k reálnějšímu modelování skutečného chování konstrukce během roku. Poněkud nepříjemná je pouze skutečnost, že výpočet podle ČSN EN ISO 13788 zcela opomíjí vnější teploty nižší, než jsou nejnižší průměrné měsíční teploty. Prakticky to znamená, že tento výpočet nezjistí, jak bude vypadat situace v konstrukci při vnější teplotě nižší než cca –5 °C. Právě proto je nutné provádět ověření toho, zda v konstrukci bude či nebude v zimním období kondenzovat vodní pára, metodikou ČSN 730540-4 s použitím návrhových okrajových podmínek (viz část **Okrajové podmínky**).

Rozdíly mezi metodikami ČSN 730540-4 a ČSN EN ISO 13788 jsou i ve výpočtu akumulovaného množství kondenzátu v konstrukci. Postup podle ČSN EN ISO 13788 předepisuje jako první krok výpočtu celoroční bilance vodní páry stanovení výchozího měsíce výpočtu, tedy prvního měsíce v roce, kdy se objeví kondenzace vodní páry v konstrukci. Dále se stanovuje postupně narůstající množství kondenzátu v konstrukci během následujících měsíců. Jakmile začne docházet k odpařování, množství naakumulované vlhkosti se postupně začne o měsíční odpar snižovat. Pokud je po roce od začátku kondenzace konstrukce suchá, stačil se vzniklý kondenzát odpařit (Obr. 1). V opačném případě se kondenzát bude v konstrukci hromadit.

Značnou výhodou takto definovaného výpočtového postupu je možnost zavést do výpočtu **počáteční zabudovanou vlhkost** či vlhkost naakumulovanou během stávající existence konstrukce. Projektanti tak po vydání ČSN EN ISO 13788 dostali do rukou alespoň přibližný výpočtový postup, jak se vyrovnat s tímto dosud neoprávněně opomíjeným fenoménem, který má ovšem často zásadní význam (např. při rekonstrukcích plochých střech)[5].

1.2.3. Relativní vlhkost vzduchu ve větrané vrstvě

Relativní vlhkost vzduchu proudícího v provětrávané vzduchové vrstvě dvouplášťových konstrukcí se stanovuje ze vztahu

$$\varphi_{cv} = \frac{p_{cv}}{p_{cv,sat}} \cdot 100 \ , \qquad [\%] \qquad (2)$$

kde $\boldsymbol{p_{cv}}$ je částečný tlak vodní páry a $\boldsymbol{p_{cv,sat}}$ je částečný tlak nasycené vodní páry v proudícím vzduchu v Pa. Hodnotu $\boldsymbol{p_{cv,sat}}$ lze zjistit na základě vypočtené teploty proudícího vzduchu.

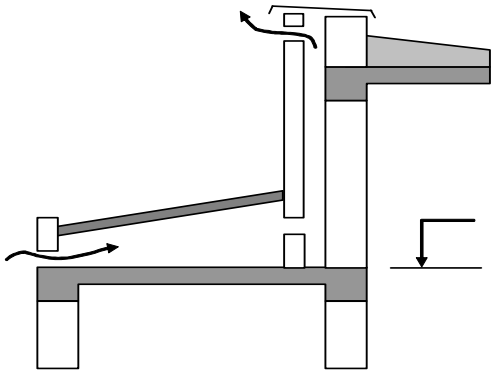
---

[4] Podrobný popis metodiky je uveden nejen v ČSN 730540-4, ale i v rozsáhlé literatuře.

[5] Výpočet roční bilance s vlivem počáteční zabudované vlhkosti ukazuje hlavně tendence ve vlhkostním chování konstrukce a nelze od něj vzhledem k jeho jednoduchosti očekávat vysokou přesnost konkrétních výsledků. Samotná norma ČSN EN ISO 13788 proto svou metodiku pro tento typ hodnocení nedoporučuje. Použije-li se nicméně tento výpočet například jen k výběru optimální varianty sanace a k výsledkům se bude přistupovat vždy s rezervou, může upravená metodika projektantovi poskytnout řadu cenných služeb.

Postup **přesného výpočtu**[6] jednotlivých veličin definuje ČSN 730540-4. Principielně se postupuje v následujících krocích:

- stanovení rychlosti proudění vzduchu v jednotlivých úsecích větrané vrstvy na základě rovnováhy mezi rozdílem tlaku vlivem gravitace, vlivem větru, vlivem tření a vlivem vřazených odporů.
  V jednotlivých úsecích větrané vrstvy (Obr. 2) vychází obecně odlišné rychlosti proudění – podle zákona kontinuity je vyšší rychlost proudění v úsecích s menším průřezem.
- stanovení průběhu teplot proudícího vzduchu
- stanovení průběhu částečných tlaků nasycené vodní páry z vypočtených teplot vzduchu
- stanovení průběhu částečných tlaků vodní páry v proudícím vzduchu
- stanovení průběhu relativních vlhkostí podle (2)
- stanovení teplotního faktoru vnějšího pláště a určení požadavku na něj podle kapitoly Vnitřní povrchová teplota.



Obr. 2 *Dvouplášťová konstrukce s více úseky*

Podrobně dále komentovat přesný výpočet není kvůli omezenému rozsahu skript možné. Podívejme se zato více na přibližný výpočet, který je na rozdíl od přesného postupu realizovatelný snadno i s pomocí kalkulačky[7].

V **přibližném výpočtu** se rychlost proudění vzduchu ve větrané vrstvě uvažuje nulová a teplota na konci vzduchové vrstvy[8] se stanovuje ze vztahu:

$$\theta_{cv} = \frac{U_i \cdot \theta_{ai} + U_e \cdot \theta_e}{U_i + U_e}, \qquad [°C] \tag{3}$$

kde $\boldsymbol{U_i}$ a $\boldsymbol{U_e}$ jsou součinitele prostupu tepla vnitřního a vnějšího pláště konstrukce ve W/(m^2.K), $\boldsymbol{\theta_{ai}}$ je návrhová teplota vnitřního vzduchu a $\boldsymbol{\theta_e}$ je návrhová venkovní teplota ve °C. Na základě teploty $\boldsymbol{\theta_{cv}}$ lze pak stanovit částečný tlak nasycené vodní páry $\boldsymbol{p_{cv,sat}}$. Zbývající částečný tlak $\boldsymbol{p_{cv}}$ se určí ze vztahu

$$p_{cv} = \frac{p_i / Z_{p,i} + p_e / Z_{p,e}}{1/Z_{p,i} + 1/Z_{p,e}}, \text{ maximálně ale jen } \boldsymbol{p_{cv,sat}}, \qquad [Pa] \tag{4}$$

kde $\boldsymbol{Z_{pi}}$ a $\boldsymbol{Z_{pe}}$ jsou difuzní odpory vnitřního a vnějšího pláště konstrukce v m/s a $\boldsymbol{p_i}$ a $\boldsymbol{p_e}$ jsou částečné tlaky vodní páry ve vnitřním a vnějším vzduchu v Pa.

Dosazením do vztahu (2) se pak stanoví relativní vlhkost vzduchu ve větrané vrstvě na jejím konci. Při použití komentovaného přibližného výpočtu nebude v této hodnotě zahrnut vliv proudění vzduchu – výsledky budou tedy dosti na straně bezpečnosti. Pokud vychází takto přibližně

---

[6] Výpočet je „přesný“ jen ve srovnání s dále komentovaným přibližným postupem. Jinak se pochopitelně jedná znovu jen o určitý model reality. Existují samozřejmě i přesnější výpočty – např. CFD modely.

[7] Přesný výpočet je dosti časově náročný a dnes se provádí prakticky výhradně s využitím výpočetní techniky.

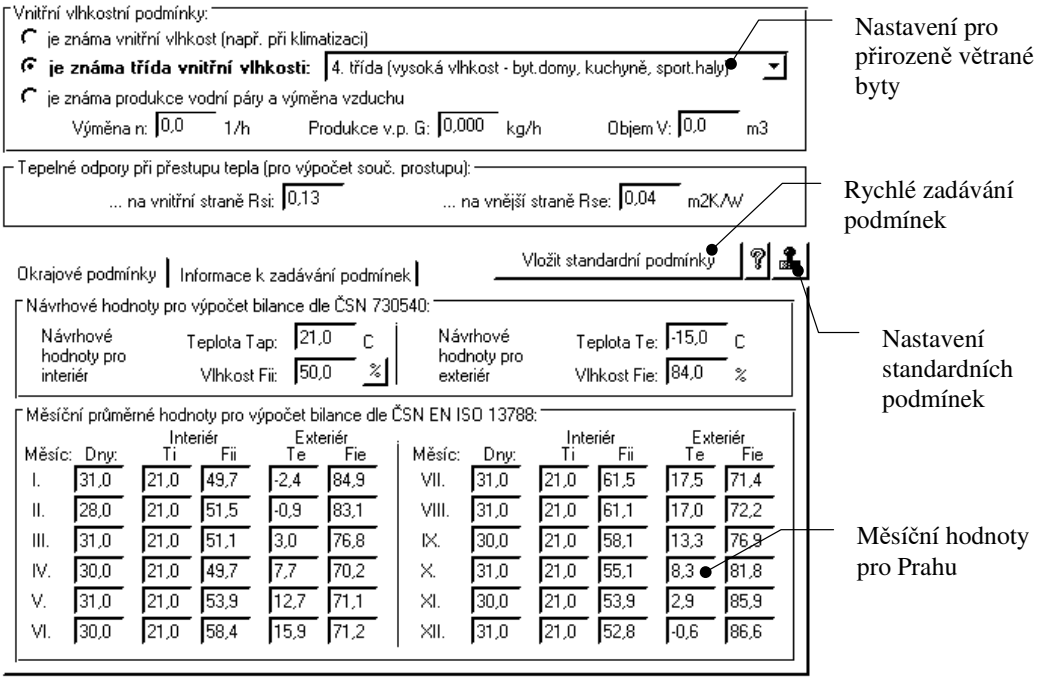
[8] Teplota na začátku větrané vrstvy je shodná s teplotou vnějšího vzduchu (návrhovou venkovní teplotou).

stanovená vlhkost vyšší než požadavek ČSN 730540-2, je možné provést ještě ověření přesným výpočtem[9].

Zbývá stanovit teplotní faktor vnějšího pláště na konci vzduchové vrstvy ze vztahu

$$f_{Rscv,e} = \frac{\left[\theta_{cv} - U_e \cdot R_{scv} \cdot \left(\theta_{cv} - \theta_e\right)\right] - \theta_e}{\theta_{cv} - \theta_e}, \qquad [°C] \qquad (5)$$

kde $\boldsymbol{\theta_{cv}}$ je teplota na konci větrané vrstvy podle (3), $\boldsymbol{\theta_e}$ je návrhová venkovní teplota ve °C, $\boldsymbol{U_e}$ je součinitel prostupu tepla vnějšího pláště konstrukce ve W/(m^2.K) a $\boldsymbol{R_{scv}}$ je tepelný odpor při přestupu tepla ve větrané vrstvě (0,10 m^2.K/W pro střechy a 0,13 m^2.K/W pro stěny). Požadavek na tuto teplotu se stanovuje podle vztahu (3) v kapitole „Vnitřní povrchová teplota“ pro vypočtené parametry vzduchu ve větrané vrstvě.



Obr. 3 *Zadání okrajových podmínek do programu Teplo*

1.3. Příklady

1.3.1. Konstrukce s vnitřní tepelnou izolací

Prvním příkladem je konstrukce s tepelnou izolací z vnitřní strany podle části **Součinitel prostupu tepla**. Pro výpočet roční bilance vodní páry byl použit program Teplo ve starší verzi[10]. Zadání skladby konstrukce do programu ukazuje Obr. 14 v části **Součinitel prostupu tepla**. Zadané okrajové podmínky pro výpočet ukazuje Obr. 3.

Část výsledků výpočtu ukazuje protokol na Obr. 4. Podívejme se nejprve na horní část výpisu. Je tam uvedeno vyhodnocení difúze vodní páry v návrhových okrajových podmínkách – tedy pro vnější parametry -15 °C a 84% a vnitřní parametry 21 °C a 50% (bod **1**). Z výsledků je zřejmé, že v konstrukci za těchto podmínek **dochází ke kondenzaci**. Z grafického výstupu lze zjistit, že ke kondenzaci dochází na rozhraní mezi tepelnou izolací a zdivem – tedy i v místech, kde jsou dřevěné latě.

U bodu **2** je na výpisu uvedena roční bilance vodní páry podle ČSN 730540-4. Množství

---

[9] Přibližný výpočet je značně nepříznivý hlavně pro konstrukce s rozdílem výšek mezi vstupním a výstupním otvorem, u kterých se uplatňuje přirozené proudění vzduchu ve větrané vrstvě i za bezvětří.

[10] Tento text původně vznikl jako skripta pro již neexistující předmět SF31 v roce 2004. Pro vytvoření příkladu byla použita tehdy aktuální verze programu.

zkondenzované vodní páry a kapacita odparu jsou zřejmé přímo z výpisu.

Zbývá roční bilance podle ČSN EN ISO 13788 (bod **3**). V tabulce nás bude zajímat především poslední sloupec – **akumulovaná vlhkost**, která ukazuje obsah kondenzátu v konstrukci na konci jednotlivých měsíců v roce. Maximální hodnota v tomto sloupci (0,024 kg/(m^2.a)) odpovídá ročnímu množství zkondenzované vodní páry.

Požadavky ČSN 730540-2 na hodnocenou konstrukci jsou uvedeny v kapitole 1.1. Konstrukce splňuje dílčí požadavek na maximální množství zkondenzované vodní páry, protože $M_{c,a}$ = 0,024 kg/(m^2.a) je menší než 0,5 kg/(m^2.a) i než 0,3 kg/(m^2.a)[11]. Konstrukce splňuje i požadavek na aktivní bilanci vodní páry, neboť veškerý vzniklý kondenzát se v roční průběhu může odpařit. Konstrukci je přesto nutné hodnotit jako rizikovou, protože není jednoznačně splněn i poslední požadavek na její bezproblémovou funkci při kondenzaci vodní páry. Kondenzací by totiž mohly být ohroženy dřevěné latě umístěné v tepelné izolaci. Navíc je nutné uvést, že chování hodnocené konstrukce bude v rozhodující míře závislé na kvalitě provedení parozábrany, což je naneštěstí značně nejistý faktor.

Difuze vodní páry v návrhových podmínkách a bilance vlhkosti dle ČSN 730540:

Průběh teplot a tlaků v návrhových okrajových podmínkách:

rozhraní:	**i**	**1-2**	**2-3**	**3-4**	**e**
tepl.[C]:	17.9	17.2	17.1	-7.9	-14.5
p [Pa]:	1243	1232	545	536	138
p,sat [Pa]:	2045	1955	1955	311	173

1

Při venkovní návrhové teplotě dochází v konstrukci ke kondenzaci vodní páry.

Celoroční bilance vlhkosti:
Množství zkondenzované vodní páry Mc,a: 0.021 kg/m2,rok
Množství vypařitelné vodní páry Mev,a: 0.824 kg/m2,rok

Ke kondenzaci dochází při venkovní teplotě nižší než 0.0 C.

2

Bilance zkondenzované a vypařené vlhkosti dle ČSN EN ISO 13788:

V konstrukci dochází během modelového roku ke kondenzaci.

3

Kondenzační zóna č. 1

Měsíc	**Hranice kondenzační zóny levá [m]**	**pravá**	**Akumul.vlhkost Ma [kg/m2]**
12	0.0926	0.0926	0.0097
1	0.0926	0.0926	0.0192
2	0.0926	0.0926	0.0244
3	0.0926	0.0926	0.0047
4	---	---	0.0000
5	---	---	---
6	---	---	---
7	---	---	---
8	---	---	---
9	---	---	---
10	---	---	---
11	---	---	---

Maximální množství kondenzátu Mc,a: 0.0244 kg/m2
Na konci modelového roku je zóna suchá (tj. Mc,a < Mev,a).

Obr. 4 *Část protokolu o výpočtu z programu Teplo*

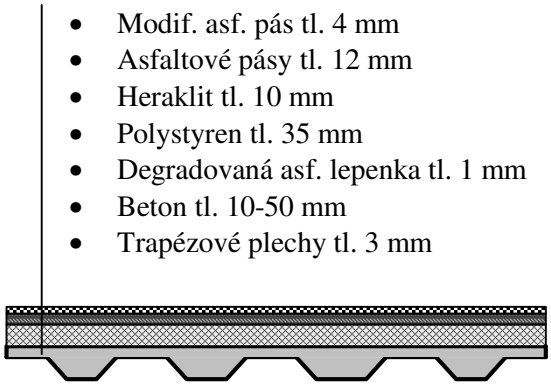
Závěrem zbývá ještě uvést, že pro vyhodnocení je vhodné používat vždy ty výsledky obou bilančních výpočtů (ČSN 730540-4 a ČSN EN ISO 13788), které jsou **méně příznivé**.

[11] Jedná se o 5% z plošné hmotnosti minerálních vláken, v nichž ke kondenzaci částečně dochází.

1.3.2. Konstrukce s počáteční zabudovanou vlhkostí

Druhým příkladem je hodnocení sanace ploché střešní konstrukce plaveckého bazénu, jejíž stávající skladbu ukazuje Obr. 5. Sondami bylo zjištěno, že heraklit se prakticky rozpadá, jeho hmotnostní vlhkost činí zhruba 80 %. Hmotnostní vlhkost polystyrenu přesahuje 60 %. Lepenka, která měla ve skladbě zřejmě plnit jakousi funkci parozábrany, je rovněž zcela degradovaná. Celkový obsah vody ve střešní konstrukci činí zhruba 3,5 kg/m^2.

Investor požadoval zvýšení tepelného odporu konstrukce a zajištění její vodotěsnosti. Jím preferovaná varianta spočívala v přidání desek z minerálních vláken tl. 140 mm a v provedení nové hydroizolace z modifikovaných asfaltových pásů.



Obr. 5 *Stávající skladba střechy bazénu*

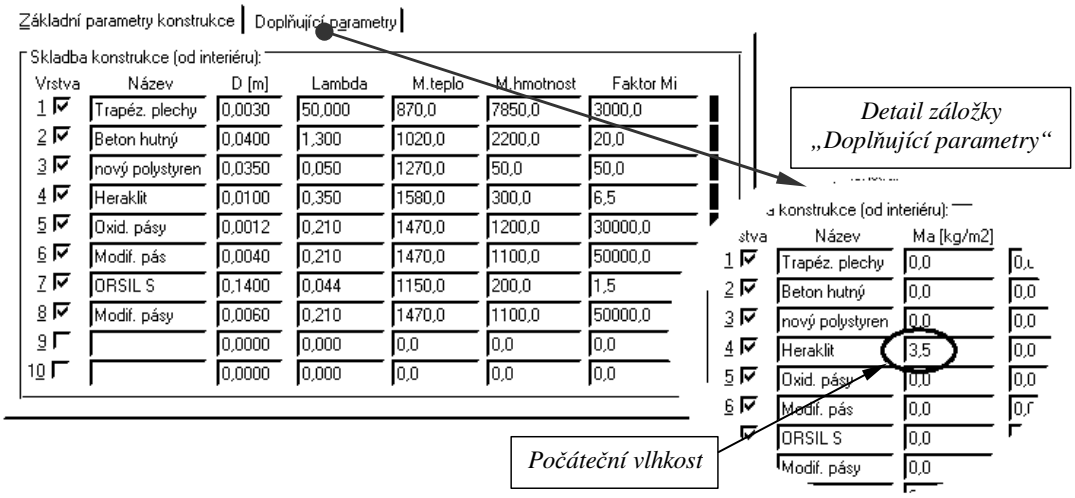
Navrhovaná sanace byla vyhodnocena s pomocí programu Teplo ve starší verzi[12]. Na Obr. 6 je vidět zadání jednotlivých vrstev konstrukce včetně počáteční zabudované vlhkosti 3,5 kg/m^2 v heraklitu. Okrajové podmínky, které byly zadány na základě měření mikroklimatu v objektu, ukazuje Obr. 7. Hodnocení bylo provedeno pro 15 let od rekonstrukce plánované na srpen.

Výsledky ukazují na poměrně rychlé vysychání stávajících vrstev – do šesti let by měl být heraklit suchý (Obr. 8). Nepříjemné ovšem je, že současně dochází ke značnému nárůstu obsahu vlhkosti v nové tepelné izolaci (Obr. 9).

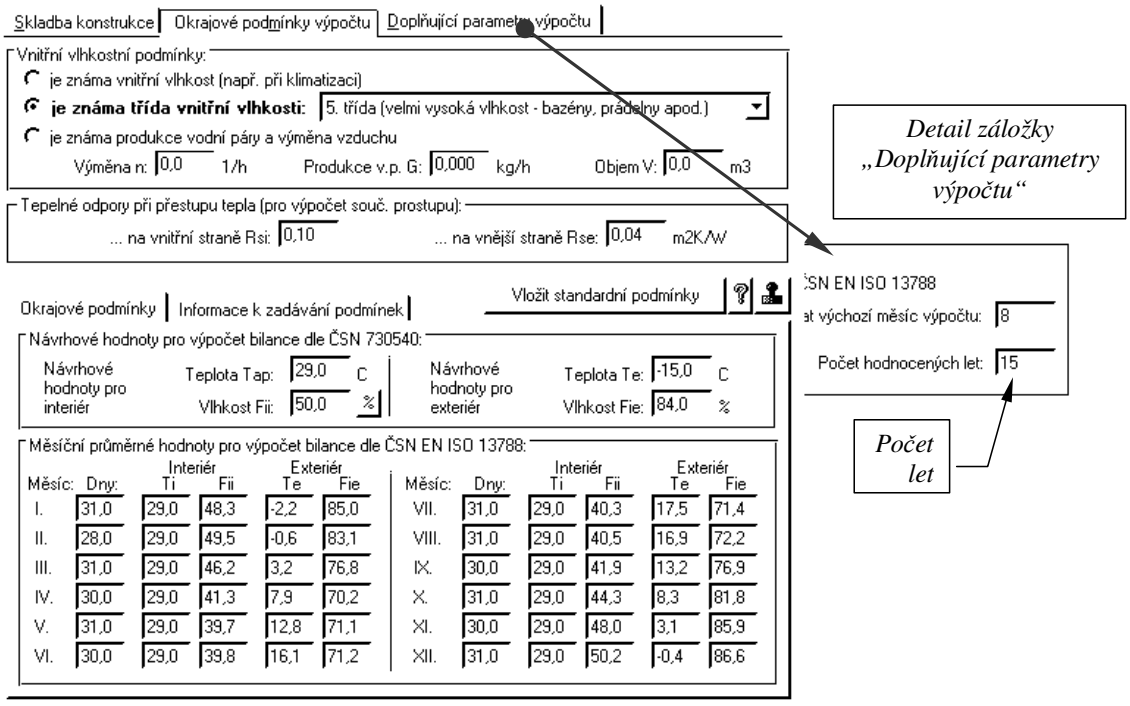
Po šesti letech obsahuje nová tepelná izolace zhruba 0,24 kg/m^2 vody, po deseti letech je to již 0,29 kg/m^2 a trend zůstává nepříznivý.

Navrhovaná rekonstrukce je tedy problematická. Na jednu stranu se po jejím provedení většina naakumulované vlhkosti odpaří, na druhou stranu se neodpařený zbytek přesune do nové tepelné izolace a tam vytvoří základ pro další hromadění kondenzátu. Navržená rekonstrukce je proto v dlouhodobém horizontu <u>nevhodná</u>.

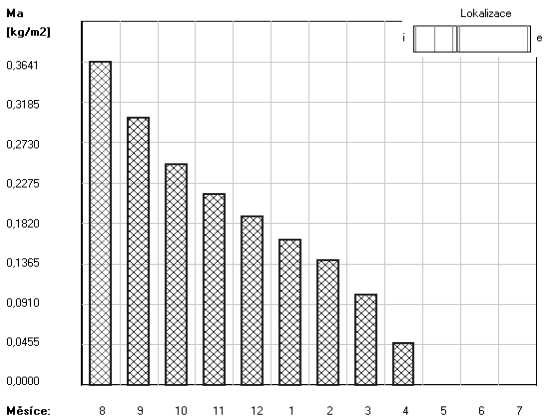
[12] Tento text původně vznikl jako skripta pro již neexistující předmět SF31 v roce 2004. Pro vytvoření příkladu byla použita tehdy aktuální verze programu.



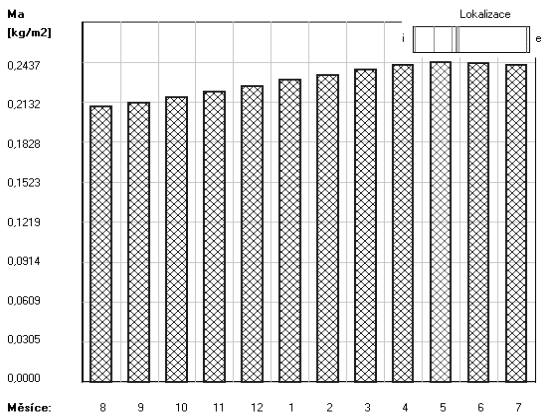
Obr. 6 *Zadání skladby konstrukce a počáteční vlhkosti*



Obr. 7 *Zadání okrajových podmínek*



Obr. 8 *Akumulovaná vlhkost v heraklitu během 6. roku od rekonstrukce*

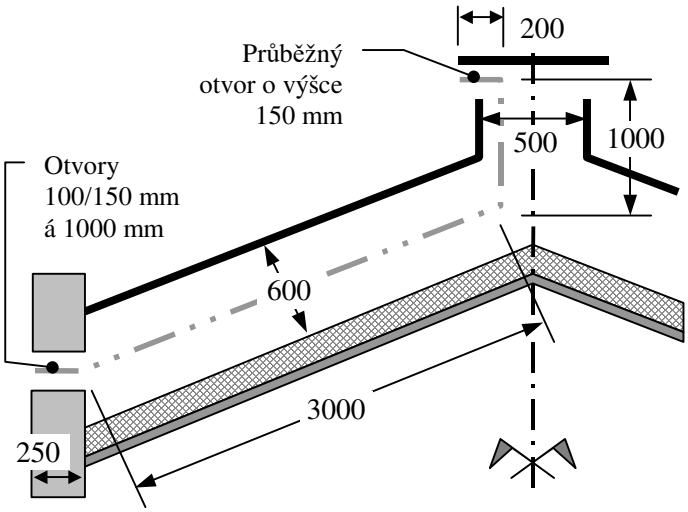


Obr. 9 *Akumulovaná vlhkost v nové tepelné izolaci během 6. roku od rekonstrukce*

1.3.3. Dvouplášťová konstrukce

Posledním příkladem je hodnocení šikmé střešní konstrukce na Obr. 10. Střecha je umístěna nad ohýbárnou dřeva s návrhovou teplotou vnitřního vzduchu 25 °C a relativní vlhkostí 70 %. Návrhová venkovní teplota je -15 °C. Skladba střechy je shora:

- trapézové plechy
- větraná vrstva
- minerální vlákna 200 mm
- bednění 25 mm
- PE folie
- sádrokarton 12,5 mm na roštu.



Obr. 10 *Šikmá dvouplášťová střecha*

Větrací otvory jsou kryté síťkami. Převýšení výstupního otvoru vůči otvoru vstupnímu je 2 m.

Požadavky na střešní konstrukci uvádí kapitola 1.1.

Při posouzení šíření vodní páry je nejprve třeba vyhodnotit **vnitřní plášť**. Po zadání skladby vnitřního pláště do programu Teplo bylo výpočtem zjištěno, že ve vnitřním plášti nedochází ke kondenzaci vodní páry. Vnitřní plášť tedy splní požadavky ČSN 730540-2 na šíření vodní páry.
Dalším krokem posouzení je vyhodnocení relativní vlhkosti ve **větrané vrstvě**. Podívejme se nejprve na **přibližný postup**. Podle vztahu (3) vychází teplota proudícího vzduchu na konci větrané vrstvy $\theta_{cv} = (0{,}18 \cdot 25 - 7{,}14 \cdot 15)/(0{,}18 + 7{,}14) = -14{,}0$ °C. Částečný tlak nasycené vodní páry $\boldsymbol{p_{cv,sat}}$ činí pro tuto teplotu 181 Pa. Zbývá určit částečný tlak vodní páry ze vztahu (4): $p_{cv} = \left(2215/45{,}7 \cdot 10^9 + 139/15{,}9 \cdot 10^9\right)/\left(1/45{,}7 \cdot 10^9 + 1/15{,}9 \cdot 10^9\right) = 674$ Pa. Vypočtená hodnota $\boldsymbol{p_{cv}}$ je vyšší než $\boldsymbol{p_{cv,sat}}$ – proto musí být $\boldsymbol{p_{cv}}$ = 181 Pa. Ze vztahu (2) pak vychází relativní vlhkost proudícího vzduchu na konci větrané vrstvy $\boldsymbol{\varphi_{cv}}$ = 100 % a konstrukce tedy nevyhovuje.

Proveďme nyní **přesnější vyhodnocení** s pomocí programu Mezera[13]. Na Obr. 11 je vidět zadání parametrů hodnocené dvouplášťové střechy do jednotlivých formulářů programu. Výpočet byl proveden pro předpoklad bezvětří.

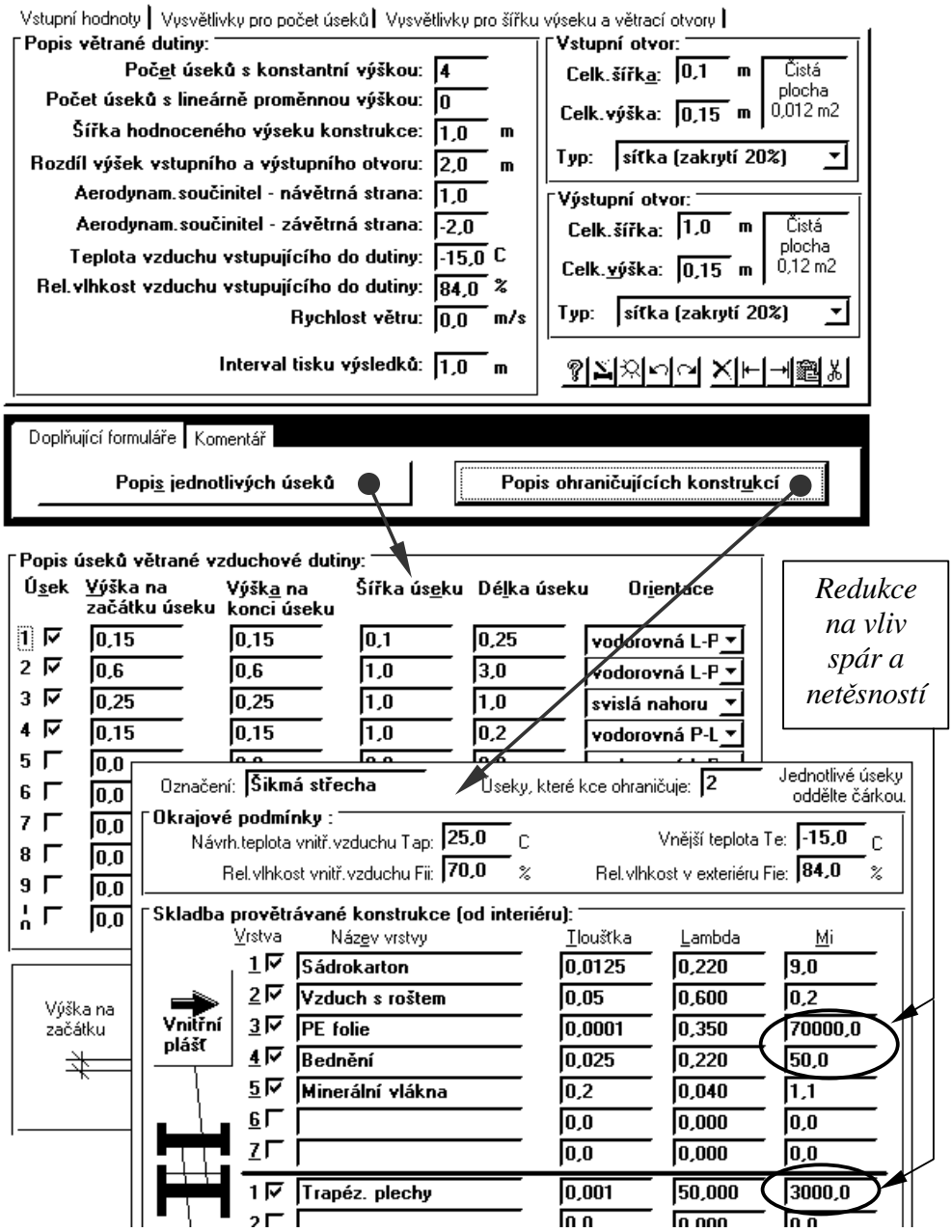
Z výpočtu vychází průměrná rychlost proudění vzduchu ve větrané vrstvě $\boldsymbol{v_{cv}}$ = 0,006 m/s. Teplota vzduchu na konci větrané vrstvy je $\boldsymbol{\theta_{cv}}$ = -14,1 °C. Tyto výsledky poměrně dobře odpovídají

[13] Tento text původně vznikl jako skripta pro již neexistující předmět SF31 v roce 2004. Pro vytvoření příkladu byla použita tehdy aktuální verze programu.

přibližnému řešení. Výrazný rozdíl je ovšem v relativní vlhkosti na konci větrané vrstvy, která z přesnějšího výpočtu vychází jen φ_{cv} = 80 %.

Teplota vnitřního povrchu vnějšího pláště na konci větrané vrstvy vychází z výpočtu programem Mezera ve výši θ_{se} = -14,7 °C a teplotní faktor je tudíž $f_{Rscv,e}$ = 0,333. Tato hodnota splní požadavek ČSN 730540-2, protože je vyšší než $f_{Rscv,e,N}$ = -0,345 °C (kritický faktor s přirážkou 0,030 podle vztahu (3) v kapitole „Vnitřní povrchová teplota“.

Na základě přesnějšího výpočtu tedy hodnocená dvouplášťová střecha splní všechny požadavky ČSN 730540-2 na šíření vodní páry konstrukcí. Upozornit je ovšem třeba na to, že chování této konstrukce závisí v rozhodující míře na kvalitě provedení parozábrany. Je proto naprosto nezbytné věnovat velkou pozornost projektovému řešení všech detailů a během realizace provádět neúnavně a pečlivě stavební dozor.



Obr. 11 *Zadání střešní konstrukce do programu Mezera*