

Analýza možných dopadů změny klimatických okrajových podmínek na obytné budovy v České republice

Pavel Kopecký, Kateřina Sojková

UCEEB, Univerzitní centrum pro energetiku efektivní budovy, Třinecká 1024, Buštěhrad

Abstrakt: Klimatické změny v budoucnu mimo jiné ovlivní budovy, technické systémy v budovách a vystavěné prostředí obecně. Tento příspěvek se zabývá možnými změnami klimatických okrajových podmínek v České republice v budoucnosti. V příspěvku je provedeno porovnání klimatických podmínek odpovídajících nedávné minulosti (referenční období 1960–1990) s očekávanými klimatickými podmínkami v období 2020–2050, resp. 2070–2100. K porovnání se využívají modelové klimatické údaje pro město Praha pocházející z modelu REMO. Výsledky ukazují na postupné prodloužení letního období, se značným navýšením počtu tropických a letních dnů, prodloužením souvislých období veder a zvýšením denních maximálních teplot. Patrně také dojde ke zkrácení zimního období, se značným snížením četnosti výskytu teplot pod bodem mrazu a ledových dnů. Dopady změny klimatických veličin jsou posléze kvantifikovány v případové studii modelového rodinného domu. Jsou vyčísleny změny potřeb tepla na vytápění (pokles v budoucnosti na přibližně tři čtvrtiny stavu v referenčním období), změny teploty vnitřního vzduchu (značné zvýšení četnosti výskytu teploty vyšší než 27 °C), resp. změny v potřebě tepla na chlazení. Roční měrná potřeba tepla na chlazení nestíněného velmi dobře tepelně izolovaného domu v období 2070–2100 se přibližovala k hodnotě 40 kWh/(m²a). Pokud nebudou obytné budovy s vysokou tepelně izolační kvalitou obálky stíněny, tak by jejich potřeba tepla na chlazení mohla v budoucnu několikanásobně převýšit potřebu tepla na vytápění. Pokud budou obytné budovy vybaveny systémem venkovního stínění, a zároveň bude tento systém důsledně používán, zůstane roční měrná potřeba tepla na chlazení a měrný špičkový výkon chlazení na nízkých hodnotách (pod 5 kWh/(m²·a), resp. ≈ 15 W/m²), a to i v případě velmi dobře tepelně izolovaných budov.

Klíčová slova: klimatické změny, okrajové podmínky, tepelná bilance budov, přehřívání

Abstract: Climate change will, among other things, affects buildings, technical systems in buildings and built environment in general. This paper deals with the expected future changes of environmental boundary conditions in the Czech Republic. The climatic conditions corresponding to the recent past (the reference period 1960-1990) are compared with the expected climatic conditions in 2020-2050, respectively in 2070-2100. Hourly climate data calculated by regional meteorological model are used. The results show a gradual prolongation of the summer season, a significant increase in the number of tropical and summer days, the prolongation of continuous hot spells and the increase in daily maximum temperatures. There will also be a shorter winter season, with a significant decrease of the frequency of temperatures below freezing point. The impacts of change in boundary conditions are then quantified in a case study of a model family house. Changes of heating and cooling demands and internal air temperature are discussed.

Key words: climate change, environmental boundary conditions, thermal balance of buildings, overheating

Obsah:

1	Úvod	4
2	Metodika	5
2.1	Modelové klimatické údaje	5
2.2	Sledované klimatické veličiny	5
2.3	Tepelný simulační model budovy	5
3	Verifikace modelových klimatických údajů	5
4	Analýza změn klimatických veličin	8
4.1	Změna ročních hodnot	8
4.2	Změna měsíčních hodnot	8
4.3	Změny v četnosti výskytu	10
4.4	Změny v hodinostupních a entalpihodinách	11
5	Případová studie.....	12
5.1	Modelový objekt.....	12
5.2	Scénáře simulace.....	13
5.3	Okrajové podmínky simulace	13
5.4	Vypočtené výsledky	14
6	Diskuze výsledků.....	16
6.1	Diskuze změny klimatických podmínek pro Českou republiku.....	16
6.2	Diskuze výsledků případové studie modelové budovy	17
6.3	Omezení platnosti výsledků	18
7	Závěry	19
	Literatura	21
	Přílohy.....	22

Značení veličin

Označení	Popis	Jednotka
T_{ae}	Teplota venkovního vzduchu	°C
T_{ai}	Teplota vnitřního vzduchu	°C
H_{Gh}	Dávka globálního slunečního ozáření dopadající na horizontální rovinu	kWh/m ²
R	Srážkový úhrn	mm
HDH	Hodinostupně pro vytápění	K·h
CDH	Hodinostupně pro chlazení	K·h
EH	Entalpihodiny	(kJ/kg _{s.v.})·h
e_h	Měrná roční potřeba tepla na vytápění	kWh/(m ² a)
e_c	Měrná roční potřeba tepla na chlazení	kWh/(m ² a)
q_h	Měrný špičkový výkon vytápění	W/m ²
q_c	Měrný špičkový výkon chlazení	W/m ²
c_a	Měrná tepelná kapacita vzduchu	J/(kg·K)
c_v	Měrná tepelná kapacita vodní páry	J/(kg·K)
h	Entalpie vlhkého vzduchu	J/kg
x	Měrná vlhkost vzduchu	kg/kg _{s.v.}
l_v	Skupenské teplo vypařování	J/kg

1 Úvod

Tání ledu a permafrostu v arktických oblastech, zvyšování průměrné teploty vody a hladiny oceánu, zvyšování teploty vzduchu, změny v cirkulaci atmosféry a vody v oceánech, a častější výskyt extrémních atmosférických událostí jsou změny, které lidstvo zaznamenává stále častěji [1]. Změna klimatických podmínek vyvolává komplexní změny, které patrně v nějaké míře ovlivní život na Zemi. Základní shrnutí očekávaných změn klimatu v České republice a jejich možných dopadů (z pohledu člověka) je dostupné z [2].

Klimatické předpovědní modely umožňují prognózu vývoje klimatu v budoucnosti, viz [3], přičemž ale není zcela jisté, jak rychle a jak intenzivně klimatické změny budou probíhat. Výpočty jsou proto často prováděny odlišnými předpovědními modely a pro různé předpokládané globální scénáře vývoje. Změny klimatických veličin jsou vztahovány ke stavu klimatu v nedávné minulosti, za které se obvykle považuje období 1960–1990 (tzv. normálové období podle Světové meteorologické organizace).

Za předpokladu naplnění IPCC scénáře A1B [4], je ve druhé polovině 21. století předpokládáno zvýšení průměrné roční hodnoty teploty vzduchu v České republice o 2 až 3 K. Scénář A1B předpokládá rychlý hospodářský růst a vývoj nových technologií, růst počtu obyvatel do roku 2050 a vyvážené využívání všech zdrojů energie.

Budovy jsou ovlivňovány klimatickými podmínkami v dané lokalitě, přičemž obálka budovy má za úkol co nejlépe ochránit vnitřní prostředí před venkovními vlivy. Stavebně energetická koncepce budovy, jako například výběr vhodných stavebních materiálů, řazení vrstev obálky, tvar budovy, velikost a orientace prosklených ploch, způsob stínění a větrání, do značné míry souvisí s klimatickým zatížením působícím v dané lokalitě. Klimatické podmínky a stavebně energetické řešení budovy ovlivňují potřebu tepla na vytápění a chlazení budov, špičkové výkony vytápění a chlazení, a mají vliv na kvalitu vnitřního prostředí v budovách. Klimatické změny v neposlední řadě mohou vést ke změně tepelně-vlhkostní bilance stavebních prvků či jednotlivých materiálů s nějakým dopadem na jejich trvanlivost.

Rodinné a bytové domy jsou v současných klimatických podmínkách České republiky běžně provozovány bez strojního chlazení. K tomu je potřeba dobrá souhra několika opatření, jako například účinné odstínění dopadajícího slunečního záření, přiměřená velikost a orientace oken vůči světovým stranám, vhodné zónování objektu, a vodivá tepelně akumulární hmota zabudovaná v blízkosti vnitřního líce stavebních prvků. Obyvatelé zároveň musí teplo přes den uložené v budově odvádět nočním větráním. U některých budov je už dnes i s těmito opatřeními obtížné udržet teplotu vnitřního vzduchu nižší než 27 °C, viz [5].

Cílem tohoto článku je provést analýzu možných budoucích změn klimatických veličin v České republice. U jednoduché modelové budovy (rodinný dům) bude následně vyčísleno, jak klimatické změny mohou změnit potřeby tepla na vytápění a chlazení, hodnoty špičkových výkonů vytápění a chlazení, a teplotu vnitřního vzduchu.

2 Metodika

2.1 Modelové klimatické údaje

V této práci byly použity klimatické údaje z projektu Climate for Culture [6] pro Prahu. Jedná se o hodinové klimatické údaje, které byly vypočteny numerickým regionálním klimatickým modelem REMO [7], který předpokládal naplnění scénáře A1B podle [4].

Modelové klimatické údaje byly vypočteny pro tři časové úseky 1960–1990, 2020–2050, 2070–2100. Každé časové období je tedy dlouhé 31 let, což představuje dostatečně reprezentativní soubor pro statistické vyhodnocení klimatických veličin. V datových souborech jsou dostupné hodinové údaje o teplotě venkovního vzduchu, relativní vlhkosti venkovního vzduchu, globálním i difúzním slunečním záření dopadající na horizontální rovinu, intenzitě srážek, rychlosti a směru větru a oblačnosti.

2.2 Sledované klimatické veličiny

Pro každé časové období se sledují průměrné roční a měsíční hodnoty teploty venkovního vzduchu, měrné vlhkosti vzduchu, dávky globálního slunečního ozáření a roční úhrny srážek. U teploty venkovního vzduchu a měrné vlhkosti se taktéž sleduje rozdělení četnosti.

Pro každé časové období se také sledovaly počty ledových dnů, mrazových dnů, letních dnů, tropických dnů a tropických nocí (definice termínů je shrnuta v tab. 1). Taktéž se sledovaly počty po sobě souvisle jdoucích tropických dnů (délka velmi teplého období) a počty po sobě souvisle jdoucích ledových dnů (délka velmi chladného období).

Tabulka 1: Definice meteorologických pojmů

Ukazatel	Podmínka
Ledový den	Denní nejvyšší teplota venkovního vzduchu nižší než 0 °C
Mrazový den	Denní nejnižší teplota venkovního vzduchu nižší než 0 °C
Letní den	Denní nejvyšší teplota venkovního vzduchu alespoň 25 °C
Tropický den	Denní nejvyšší teplota venkovního vzduchu alespoň 30 °C
Tropická noc	Denní nejnižší teplota venkovního vzduchu neklesla pod 20 °C

Pro jednotlivá časová období byly také vypočteny hodinostupně pro vytápění (pro referenční teplotu 13 °C), hodinostupně pro chlazení (pro referenční teplotu 25 °C), a entalpihodiny (pro referenční entalpii $h_{25/40}$ odpovídající teplotě 25 °C a relativní vlhkosti 40 %), podle vztahů:

$$HDH_{13} = \Sigma(13 - T_{ae})^+, \quad \text{resp.} \quad CDH_{25} = \Sigma(T_{ae} - 25)^+ \quad (1)$$

$$EH_{25/40} = \Sigma(h_{ae} - h_{25/40})^+ \quad (2)$$

Entalpie h byla vypočtena ze vztahu:

$$h = c_a T_{ae} + x(c_v T_{ae} + l_v) \quad (3)$$

kde c_a je měrná tepelná kapacita suchého vzduchu (1006 J/(kg·K)), c_v je měrná tepelná kapacita vodní páry (1840 J/(kg·K)), x je měrná vlhkost vzduchu a l_v je skupenské teplo vypařování ($2,5 \cdot 10^6$ J/kg).

2.3 Tepelný simulační model budovy

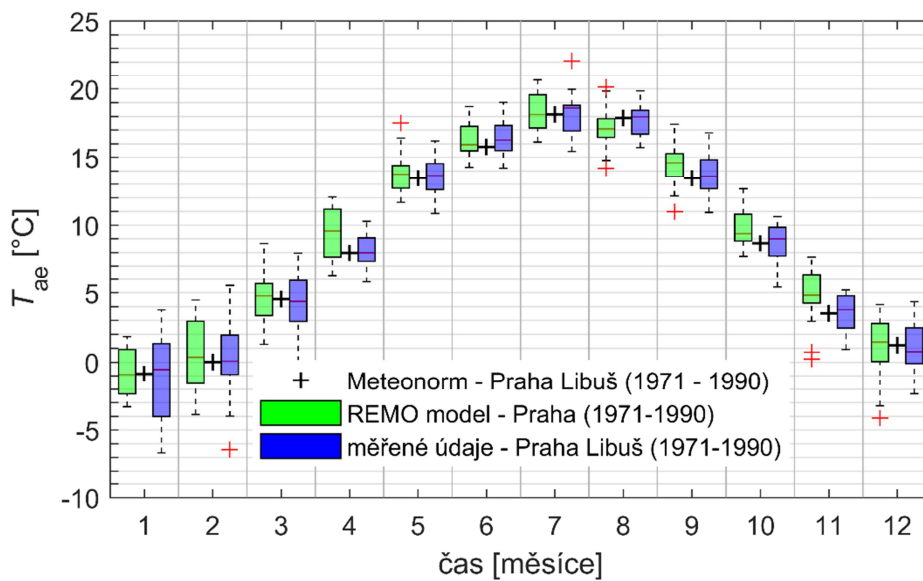
Výpočty potřeb tepla na vytápění a chlazení byly provedeny vlastním simulačním modelem implementovaným v prostředí Matlab a Simulink [8]. Model byl podrobněji popsán v příspěvku [9].

3 Verifikace modelových klimatických údajů

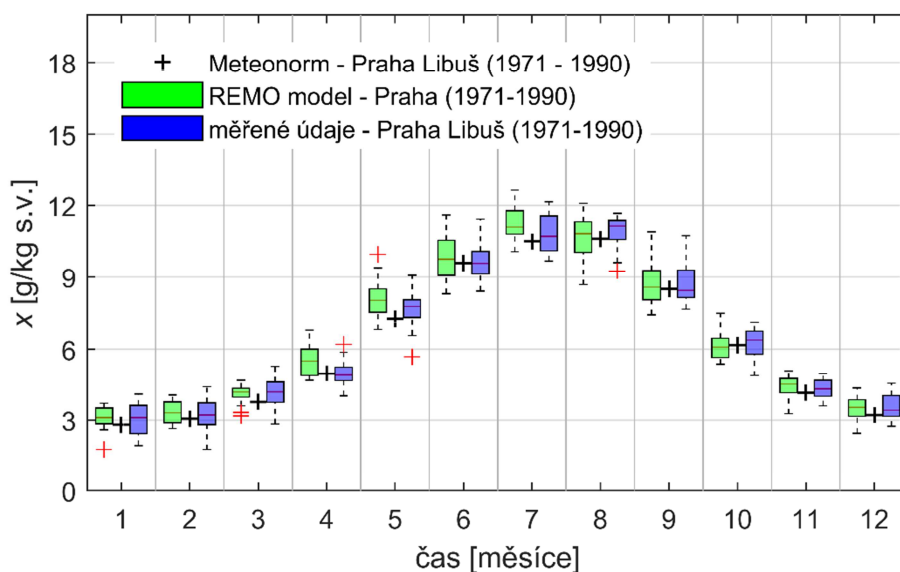
Nejprve je potřeba zjistit, zda modelové klimatické údaje dostatečně věrně vyjadřují reálné klimatické podmínky v dané lokalitě. Modelové klimatické údaje pro Prahu [6] byly proto porovnány s

měřenými klimatickými údaji ze stanice Praha Libuš [10]. Pro porovnání byly použity údaje z časového období 1971 – 1990. Vzájemné porovnání je navíc doplněno průměrnými měsíčními hodnotami získanými ze softwaru Meteonorm [11].

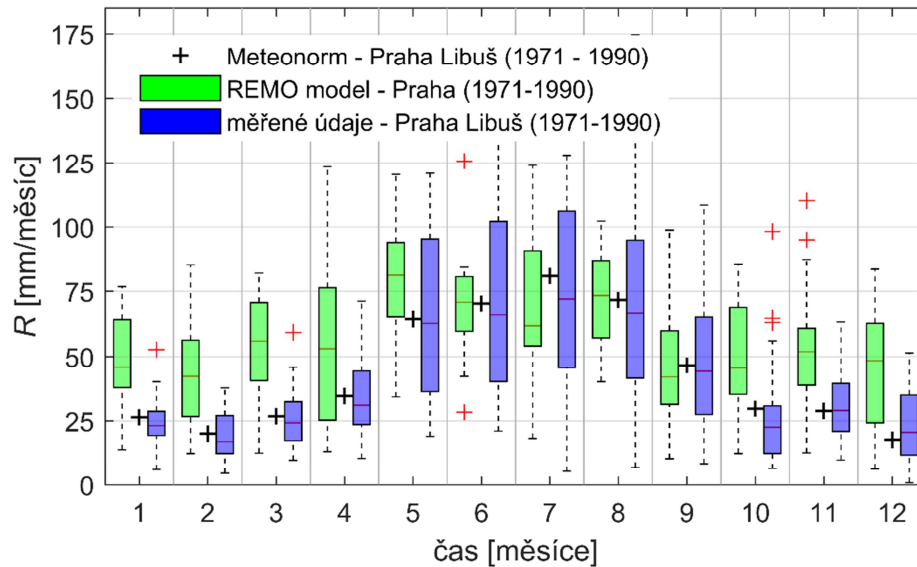
Z průměrných měsíčních hodnot teploty, měrné vlhkosti a srážek byly vytvořeny krabicové grafy (viz obr. 1 až obr. 3). Krabicový graf zobrazuje rozložení veličiny pomocí kvartilů. Spodní a horní hrana krabice představuje 1. a 3. kvartil, a tedy mezi oběma hranami se nachází 50 % hodnot z datového souboru. Čára uvnitř krabice vyznačuje medián. Horní a spodní hrana „fousu“ krabicového diagramu představuje vzdálenost 1,5 násobku rozdílu mezi hodnotou 1. a 3. kvartilu od horní a spodní hrany krabice. Pokud mají data normální rozdělení pravděpodobnosti, tak mezi oběma fousy se nachází 99,3 % hodnot. Červené křížky jsou odlehlé hodnoty. Z důvodu zachování viditelnosti jsou krabicové diagramy na obr. 1 až obr. 3 posunuty nalevo a napravo od svislých čar vyznačujících jednotlivé měsíce.



Obrázek 1: Porovnání údajů z modelu REMO a měřených údajů ze stanice Praha Libuš: průměrné měsíční teploty venkovního vzduchu



Obrázek 2: Porovnání modelových a měřených údajů ze stanice Praha Libuš: průměrné měsíční měrné vlhkosti venkovního vzduchu



Obrázek 3: Porovnání REMO modelu a měřených údajů ze stanice Praha Libuš: měsíční srážkové úhrny

Modelové údaje pro teplotu venkovního vzduchu (viz obr. 1) a měrnou vlhkost (viz obr. 2) v období 1960–1990 jsou posazeny o něco výše, než jsou měřené údaje. Průměrná roční teplota dopočtená z měřených údajů v Praze Libuši byla 8,7 °C, zatímco průměrná roční teplota dopočtená z modelových údajů je 9,3 °C. Průměrná roční měrná vlhkost dopočtená z měřených údajů byla 6,4 g/kg_{s.v.}, zatímco průměrná roční měrná vlhkost dopočtená z modelových údajů je 6,6 g/kg_{s.v.}. V případě srážkových úhrnů (viz obr. 3) je patrný výraznější nesoulad mezi modelem a měřenými údaji. Roční srážkový úhrn dopočtený z měřených údajů byl 527 mm, zatímco průměrný roční úhrn srážek dopočtený z modelových údajů byl 675 mm.

Při pohledu na jednotlivé měsíční hodnoty není teplotní rozdíl příliš výrazný. K nadhodnocení teploty dochází zejména u jarních měsíců. Srážkové úhrny jsou výrazně nadhodnoceny zejména v chladné části roku (viz obr. 3), zatímco shoda údajů v teplé části roku je o dost lepší. Rozdíl v měrné vlhkosti je patrný taktéž zejména během jarních měsíců a patrně souvisí s nadhodnocením srážek a teplot.

Teplota venkovního vzduchu je modelem předpovídána s menší chybou, než vlhkost vzduchu či srážky. Srážkové úhrny jsou značně nadhodnoceny. S tímto ohledem je posléze potřeba přistupovat k výsledkům prezentovaným v následujících kapitolách.

4 Analýza změn klimatických veličin

4.1 Změna ročních hodnot

Změny ročních hodnot klimatických veličin jsou shrnuty v tab. 2. Průměrná roční teplota venkovního vzduchu je v období 2070–2100 vyšší o 2,8 °C. Průměrná roční měrná vlhkost je v období 2070–2100 vyšší o 1,6 g/kg_{s.v.}. Průměrná roční dávka globálního ozáření je nižší o 44 kWh/m² (pokles o cca 4 %). Počet tropických dnů je v období 2070–2100 více než trojnásobný, zatímco počet ledových dnů klesá přibližně na jednu třetinu.

Tabulka 2: Roční klimatické ukazatele (Praha, REMO model, vypočteno pro IPCC scénář A1B)

Veličina	Jednotka	1960-1990	2020-2050	2070-2100
Průměrná roční teplota venkovního vzduchu	[°C]	9,3	10,3	12,1
Průměrná roční maximální teplota venkovního vzduchu	[°C]	32,9	33,6	37,0
Průměrná roční minimální teplota venkovního vzduchu	[°C]	-14,9	-10,5	-6,3
Průměrná roční relativní vlhkost vzduchu	[%]	74	74	74
Průměrná roční měrná vlhkost vzduchu	[g/kg _{s.v.}]	6,6	7,2	8,2
Průměrná roční dávka globálního slunečního ozáření na horizontální rovinu	[kWh/(m ² rok)]	1031	1004	987
Průměrný počet ledových dnů	[dny/rok]	35	25	10
Průměrný počet mrazových dnů	[dny/rok]	74	59	33
Průměrný počet letních dnů	[dny/rok]	33	41	63
Průměrný počet tropických dnů	[dny/rok]	6	8	20
Průměrný počet tropických nocí	[dny/rok]	1	1	8
Průměrný roční srážkový úhrn	[mm/rok]	675	713	743
Průměrný počet srážkových dní s úhrnem ≥ 5 mm	[dny/rok]	44	44	46
Průměrný počet srážkových dní s úhrnem ≥ 10 mm	[dny/rok]	14	16	17
Průměrný maximální denní srážkový úhrn	[mm/den]	29	39	41

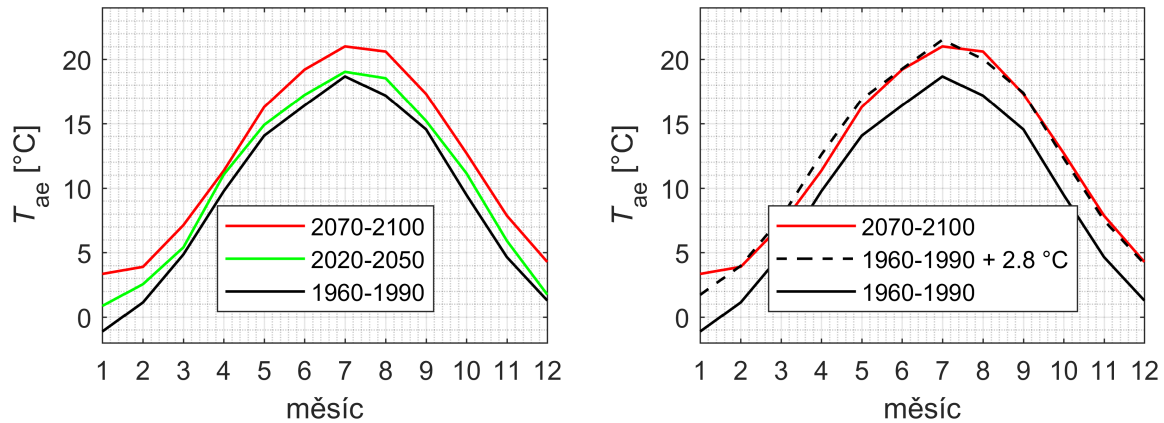
4.2 Změna měsíčních hodnot

Průběh měsíčních průměrných hodnot teploty venkovního vzduchu je zobrazený na obr. 4 vlevo. Posun teplot směrem vzhůru mezi časovými obdobími není stejně výrazný pro všechny měsíce. Posun je nejvýraznější v nejchladnějším měsíci roku (leden) a zároveň nejméně výrazný na jaře (duben). Obr. 4 vpravo zobrazuje odhad měsíčních průměrných teplot venkovního vzduchu v období 2070–2100, pokud by se průběh odpovídající období 1960–1990 jednoduše posunul vzhůru o vhodnou konstantní hodnotu, a to o 2,8 °C (2,8 °C představuje rozdíl průměrných ročních venkovních teplot v období 2070–2100 a období 1960–1990, viz tab. 2).

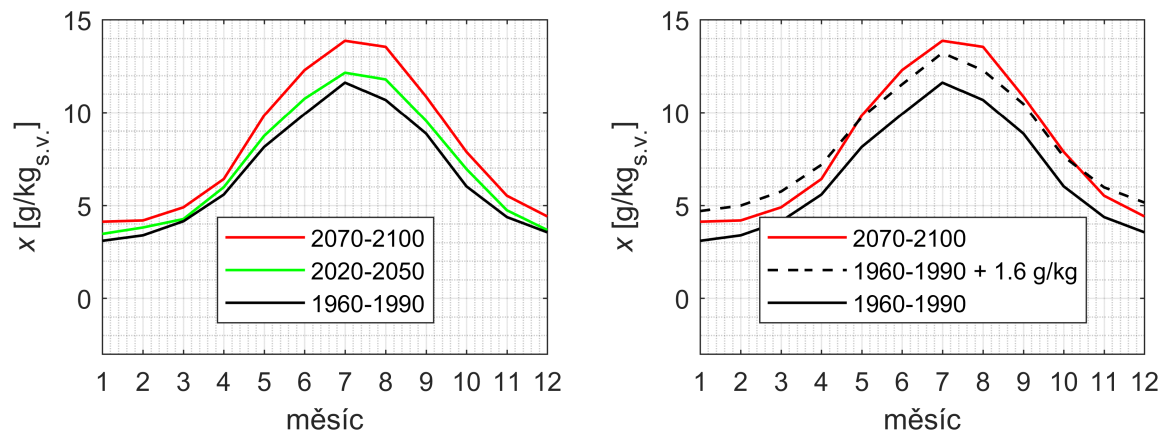
Průběh měsíčních průměrných hodnot měrné vlhkosti venkovního vzduchu je zobrazený na obr. 5 vlevo. Měrná vlhkost venkovního vzduchu v období 2070–2100 je vyšší než v období 1960–1990. Zvýšení je nejvýraznější během letního období (přibližně 2,5 g/kg_{s.v.}). V zimních měsících není zvýšení tak výrazné (přibližně 0,8 g/kg_{s.v.}). Použití konstantního posunutí (1,6 g/kg_{s.v.} je rozdíl průměrných měrných vlhkostí mezi 2070–2100 a 1960–1990, viz tab. 2) tedy vede k výraznější chybě, než tomu bylo u teplot venkovního vzduchu (viz obr. 5, vpravo).

Průběh měsíčních průměrných dávek globálního slunečního ozáření je zobrazený na obr. 6. Budoucí období vykazují malý, ale zaznamatelný, pokles měsíčních dávek ozáření (< 10 kWh/(m²měsíc)).

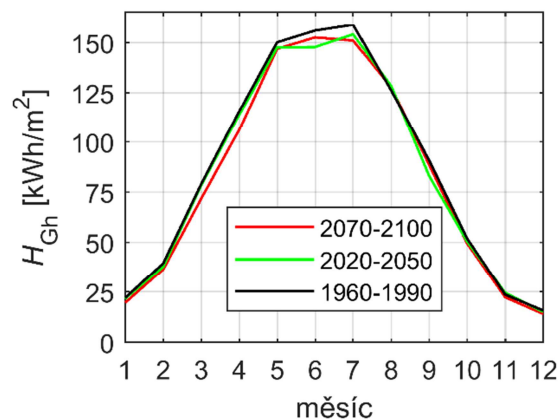
Průběh průměrných měsíčních úhrnů srážek je zobrazený na obr. 7. Měsíční srážkové úhrny v období 2070–2100 jsou systematicky vyšší v zimních měsících než srážky v období 1960–1990.



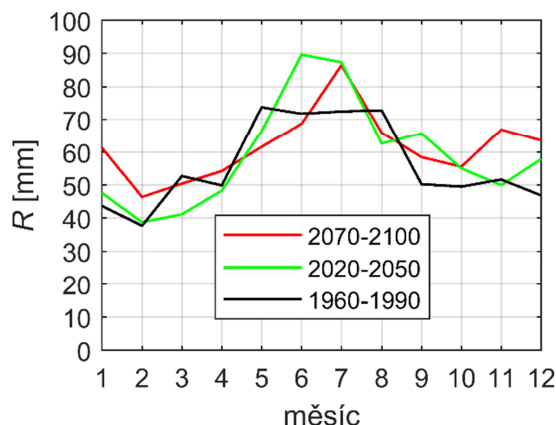
Obrázek 4: Průběh měsíčních průměrných hodnot teploty venkovního vzduchu (Praha) pro jednotlivá časová období



Obrázek 5: Průběh měsíčních průměrných hodnot měrné vlhkosti venkovního vzduchu (Praha) pro jednotlivá časová období



Obrázek 6: Průběh měsíčních průměrných dávek globálního slunečního ozáření na vodorovnou rovinu pro jednotlivá časová období



Obrázek 7: Průběh měsíčních úhrnů srážek na horizontální rovině pro jednotlivá časová období

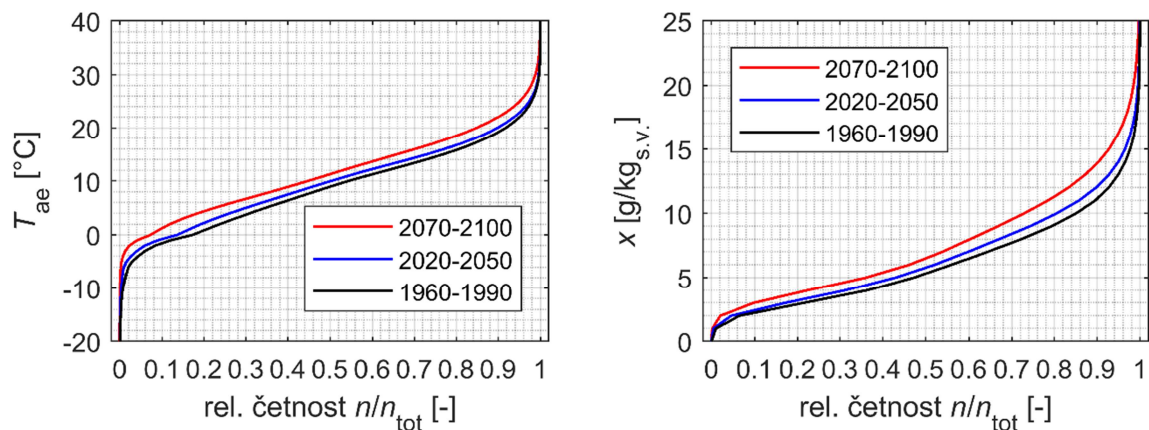
4.3 Změny v četnosti výskytu

Změny absolutních četností výskytu teploty a měrné vlhkosti venkovního vzduchu v daném období jsou shrnuty v tab. 3. Změna relativní četnosti teploty a měrné vlhkosti je zobrazena na obr. 8. Změny v rozložení pravděpodobnosti výskytu teplot jsou také zobrazeny na obr. 9 pro nejchladnější a nejteplejší měsíc v roce. Změna četnosti počtu po sobě souvisle jdoucích ledových dnů (délka velmi chladného období) je zobrazena na obr. 10 vlevo. Změna četnosti počtu po sobě souvisle jdoucích tropických dnů (délka velmi teplého období) je zobrazena na obr. 10 vpravo.

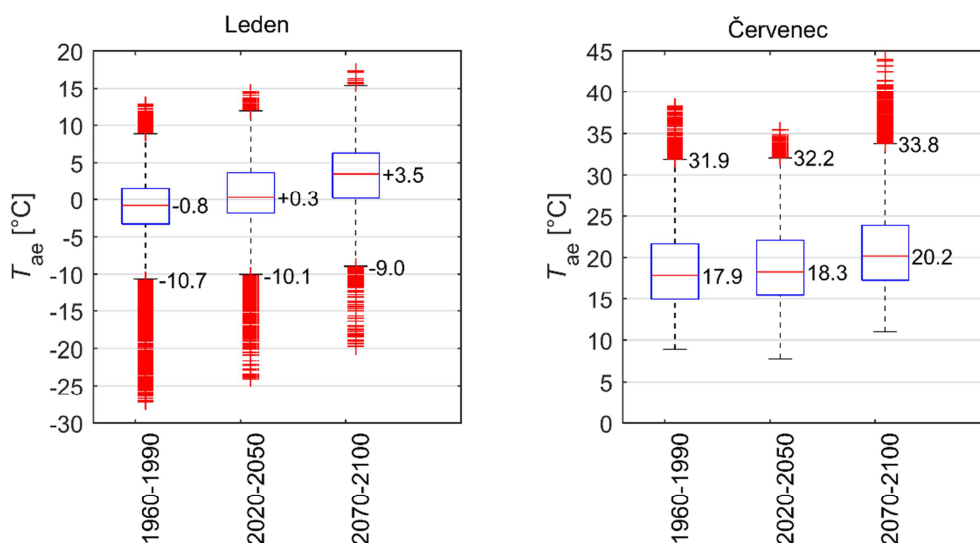
Tabulka 3: Průměrná absolutní četnost výskytu teplot a měrné vlhkosti v daném intervalu během časového období.

Interval teplot [°C]	Met*	Praha (REMO model [7])			Interval měrných vlhkostí [g/kg]	Met*	(REMO model [7])		
	1960-1990	1960-1990	2020-2050	2070-2100		1960-1990	1960-1990	2020-2050	2070-2100
≤ -20	0	6	1	0	≤ 3	1537	1129	879	434
$(-20, -10>$	52	52	25	4	$(3, 6>$	3368	3391	3296	3192
$(-10, 0>$	1288	1182	925	466	$(6, 9>$	2039	2126	2024	1944
$(0, 10>$	3573	3292	3216	3209	$(9, 12>$	1153	1347	1502	1527
$(10, 20>$	2998	3395	3569	3592	$(12, 15>$	448	520	690	930
$(20, 30)$	843	802	984	1365	$(15, 18)$	188	178	254	437
≥ 30	6	30	40	123	≥ 18	27	66	112	267

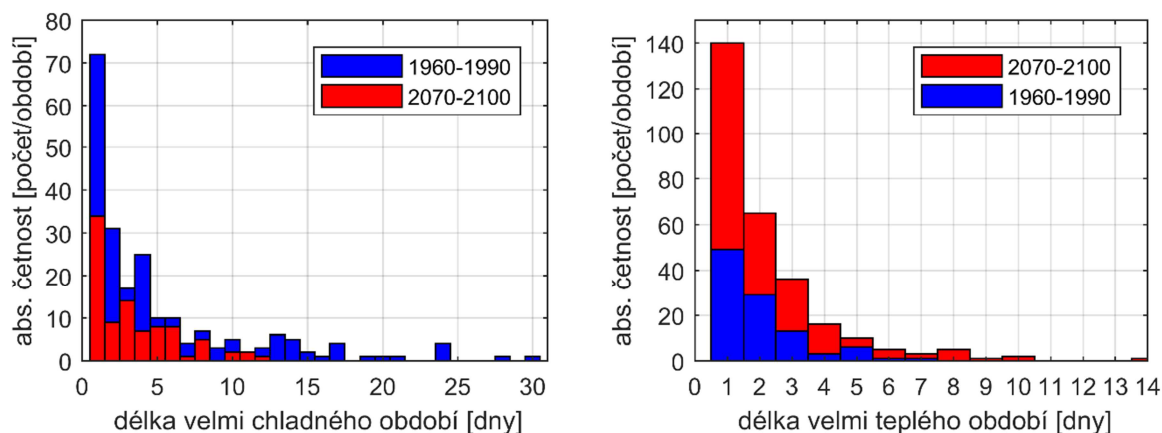
*údaje ze softwaru Metonorm [11]



Obrázek 8: Změna relativní četnosti teploty (vlevo) a měrné vlhkosti (vpravo) venkovního vzduchu



Obrázek 9: Rozložení pravděpodobnosti výskytu teploty venkovního vzduchu pro nejstudenější (vlevo) a nejteplejší měsíc (vpravo) v roce (červeně vyznačeny odlehle hodnoty)



Obrázek 10: Absolutní četnosti délky velmi chladného a velmi teplého období (porovnání mezi obdobími 1960–1990 a 2070–2100)

4.4 Změny v hodinostupních a entalpihodinách

Hodinostupně pro vytápění a chlazení vypočtené podle vztahu (1), resp. entalpihodiny vypočtené podle vztahu (2) jsou shrnuty v tab. 4. Potřeba tepla na vytápění a potřeba tepla na chlazení budov je do jisté míry ovlivňována počtem hodinostupňů. Pokud budeme zjednodušeně uvažovat potřeby jako přímo úměrné počtu hodinostupňů, tak potřeba tepla na vytápění v období 2070–2100 může klesnout přibližně o jednu třetinu v porovnání se stavem v nedávné minulosti a potřeba tepla na chlazení (jen citelné teplo) se může přibližně 3 x zvýšit. Obdobný vzestupný trend lze také sledovat u entalpihodin.

Tabulka 4: Hodinostupně pro vytápění a chlazení a entalpihodiny

Veličina	Praha		
	1960-1990	2020-2050	2070-2100
HDH13 [K·h]	47937	41608	32574
CDH25 [K·h]	558	712	1667

EH25/40 [(kJ/kg _{s.v.})·h]	11996	16600	29979
--------------------------------------	-------	-------	-------

5 Případová studie

5.1 Modelový objekt

Modelový objekt (viz obr. 11) představuje rodinný dům s jednoduchou geometrií (rozměry 13,7 × 7,3 × 6,12 m). Budova svou velikostí a rozložením průsvitných ploch v rámci fasády odpovídá dnešnímu standardu výstavby rodinných domů. Uvažují se dvě konstrukční varianty – zděná budova (V1) a dřevostavba (V2) a tři varianty úrovně tepelné izolace obálky budovy (RF – referenční varianta, LE – obálka budovy s parametry nízkoenergetického domu, PH – obálka budovy s parametry pasivního domu). Venkovní objem modelového objektu zůstává v jednotlivých variantách stále stejný.

Součinitele prostupu tepla a plochy stavebních prvků jsou shrnuty v tab. 5. Skladby stavebních prvků, uvažované vlastnosti jednotlivých materiálových vrstev a vlastnosti zasklení jsou podrobně shrnuty v tab. 7, tab. 8 a tab. 9 (viz příloha). Podlaha na zemině se pro zjednodušení považuje za dokonale tepelně izolovanou. Toto zjednodušení mírně podhodnocuje potřebu tepla na vytápění a mírně nadhodnocuje potřebu tepla na chlazení. Zjednodušení nicméně zásadně neovlivňuje trendy výstupních veličin (porovnání mezi jednotlivými časovými obdobími).

	Zastavěná plocha [m ²]	100
	Objem [m ³]	612
	Ochlazovaná plocha [m ²]	457
	Objemový faktor tvaru [m ² /m ³]	0,75
	Vytápěná podlahová plocha z celkových vnitřních rozměrů [m ²]	159–170 (V1) 172–184 (V2) *
	* nejvyšší hodnoty odpovídají variantě REF, nejnižší hodnoty odpovídají variantě PH	

Obrázek 11: Modelový rodinný dům (pohled na jižní a západní fasádu) a jeho základní geometrické parametry

Tabulka 5: Plochy a tepelně izolační kvalita stavebních prvků

Stavební prvek	Plochy A [m ²]	RF	LE	PH
		U [W/(m ² K)]		
Venkovní stěna	201,83	0,30	0,24	0,15
Střecha	100	0,24	0,18	0,13
Podlaha na zemině	100	0	0	0
Okna	východ	1,5	1,0	0,7
	jih			
	západ			
	sever			
Tepelné mosty a vazby	-	0,05	0,02	0
Agregované tepelné charakteristiky obálky budovy	Průměrný součinitel prostupu tepla obálky budovy U_{em} [W/(m ² K)]	0,39	0,27	0,17
	Celková tepelná kapacita	0,30 pro V1		

	budovy, vztažená k ochlazované. ploše obálky $C [MJ/(m^2K)]$	0,10 pro V2
Vysvětlivky: RF – referenční varianta, LE – nízkoenergetický dům, PE – pasivní dům, V1 – zděná budova, V2 - dřevostavba		

Předpokládá se, že uvnitř budovy žije čtyřčlenná rodina. Obsazenost a časový profil vnitřních tepelných zisků přesně odpovídá „Rodině 2“ z literatury [14], průměrně 348 W/dům, tj. 2 W/m² podlahové plochy. Rodinu tvoří dva dospělí rodiče a dvě děti. Jeden rodič je přes den pryč, druhý je i s menším dítětem v domácnosti. Větší dítě je přes den ve škole.

Přívod čerstvého vzduchu do modelového domu je zajištěn mechanickým větráním se zpětným získáváním tepla (účinnost ZZT 85 % pro variantu PH, 75 % pro variantu LE, resp. 0 % pro variantu RF, bypass rekuperátoru je aktivován, když $T_{ae} > 15$ °C, bypass je deaktivován, když $T_{ae} < 5$ °C). Množství čerstvého vzduchu je ve všech variantách uvažováno jako závislé na počtu přítomných osob (dávka 25 m³/(h·os)). Do větrací jednotky se přivádí vzduch s teplotou rovnající se teplotě venkovního vzduchu. Zvýšení intenzity větrání během noci se neuvažuje.

Předpokládá se, že systém vytápění a chlazení má neomezený a okamžitě dostupný výkon. Systém udržuje požadované teploty vnitřního vzduchu 21 °C (vytápění) a 26 °C (chlazení). Předpokládá se, že teplo od systému vytápění a chlazení se předává ze 100 % prouděním.

Modelová budova je také vybavena venkovním pohyblivým stínícím systémem. Činitel stínění v aktivovaném stavu se uvažuje hodnotou 0,3 (snížení hodnoty globálního slunečního ozáření venkovní roviny skla na 30 %). Uvažuje se, že stínění je aktivováno právě tehdy, když průměrná vnitřní operativní teplota překročí 25 °C. Stínění je naopak deaktivováno, když operativní teplota klesne pod 22 °C (za předpokladu, že stínění již předtím bylo v aktivovaném stavu).

5.2 Scénáře simulace

Simulace modelového rodinného domu byly provedeny pro tři různé scénáře využití systému vytápění, chlazení a venkovního stínění (viz tab. 6).

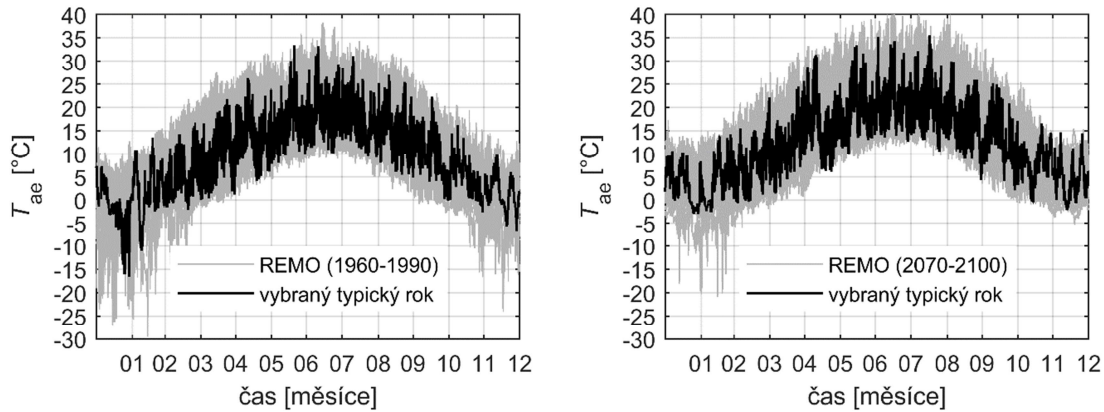
Tabulka 6: Scénáře simulace modelové budovy

Scénář	Vytápění	Chlazení	Stínění
Simulace 1	ano	ne	ano
Simulace 2	ano	ano	ne
Simulace 3	ano	ano	ano

5.3 Okrajové podmínky simulace

Tepelné simulace modelového objektu nebyly provedeny pro každý rok z datového souboru, což by bylo příliš časově náročné. Místo toho byl z každého datového souboru vybrán typický rok (viz obr. 12). S vybranými typickými roky byly pro každé časové období provedeny tepelné simulace modelové budovy.

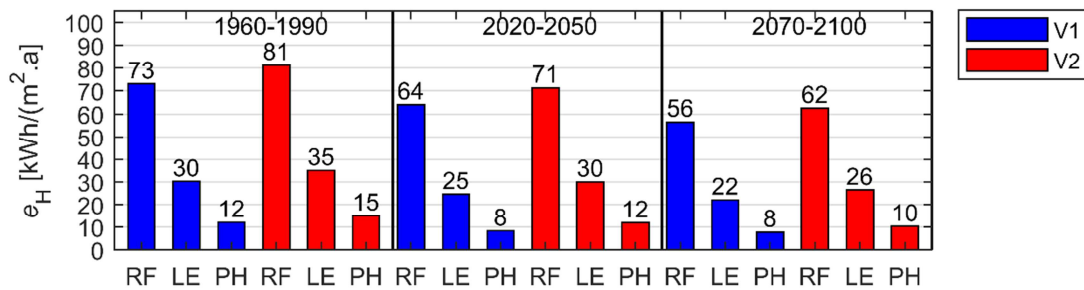
Použitá metoda výběru typického roku byla v principu obdobná metodě výběru typického meteorologického roku popsané v literatuře [12]. Z hodinových teplotních údajů se pro každý měsíc a rok vytvořilo kumulativní rozdělení četnosti (distribuční funkce), které se posléze porovnávalo s kumulativním rozdělením četnosti dopočteným pro každý měsíc ze všech let v datovém souboru. Typický rok je posléze složený z měsíců, které vykazují nejmenší odchylku svojí distribuční funkce od rozdělení četnosti vytvořeného ze všech let v datovém souboru. Výběr typických měsíců byl zjednodušeně proveden pouze na základě teploty venkovního vzduchu, ostatní klimatické veličiny při výběru nehrály roli.



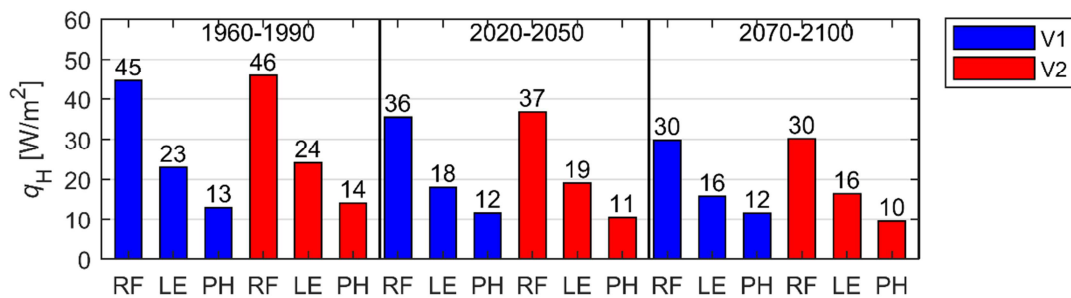
Obrázek 12: Vybrané typické roky pro časová období 1960–1990 a 2070–2100 (průběh teploty venkovního vzduchu)

5.4 Vypočtené výsledky

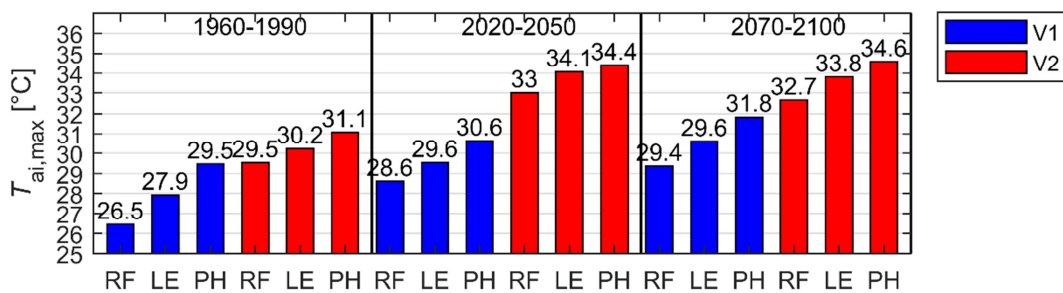
Vypočtené měrné potřeby tepla a měrné špičkové výkony vytápění jsou zobrazeny na obr. 13, resp. obr. 14. Roční maximální teplota vnitřního vzduchu a počet hodin, kdy je teplota vnitřního vzduchu vyšší než 27 °C jsou zobrazeny na obr. 15 a obr. 16. Počet hodinostupňů, kdy teplota vnitřního vzduchu přesáhla 27 °C je zobrazený na obr. 17.



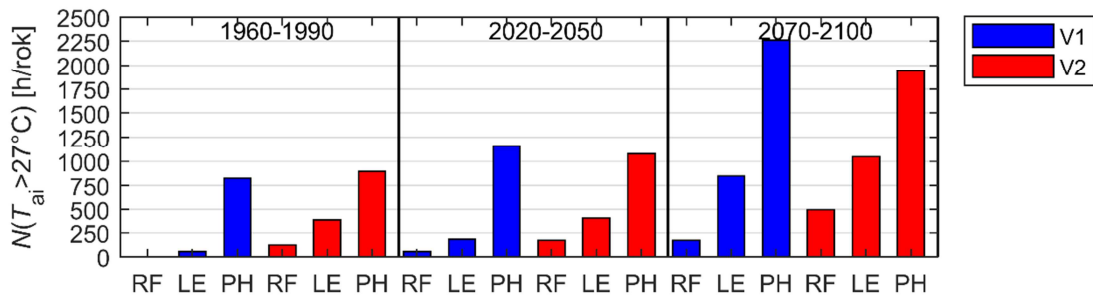
Obrázek 13: Simulace 1 - měrná potřeba tepla na vytápění



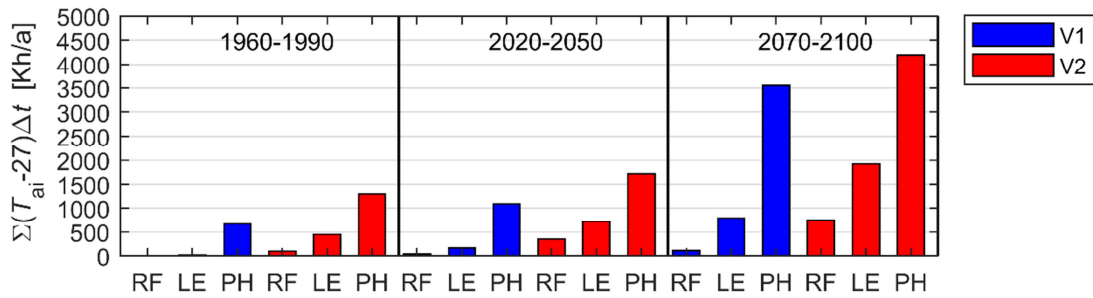
Obrázek 14: Simulace 1 - špičkový výkon vytápění



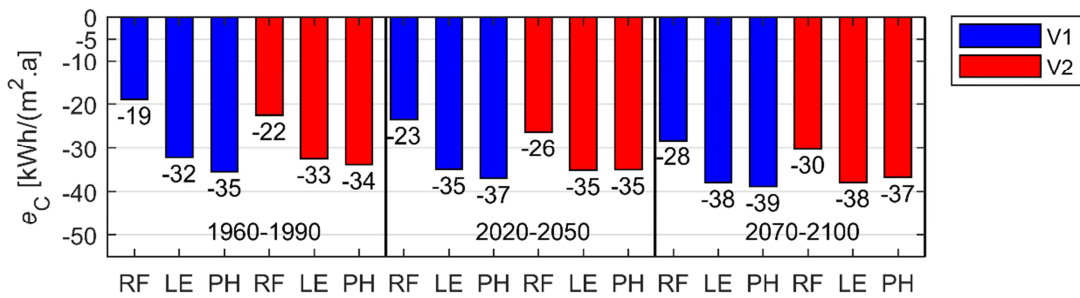
Obrázek 15: Simulace 1 - roční maximální teplota vnitřního vzduchu



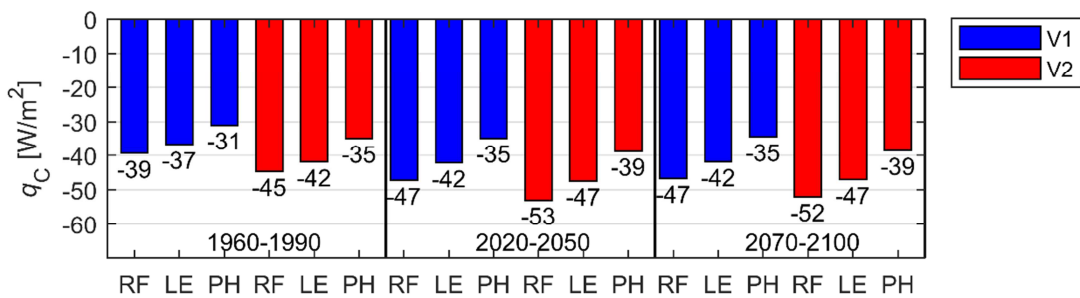
Obrázek 16: Simulace 1 - četnost teploty vnitřního vzduchu vyšší než 27 °C



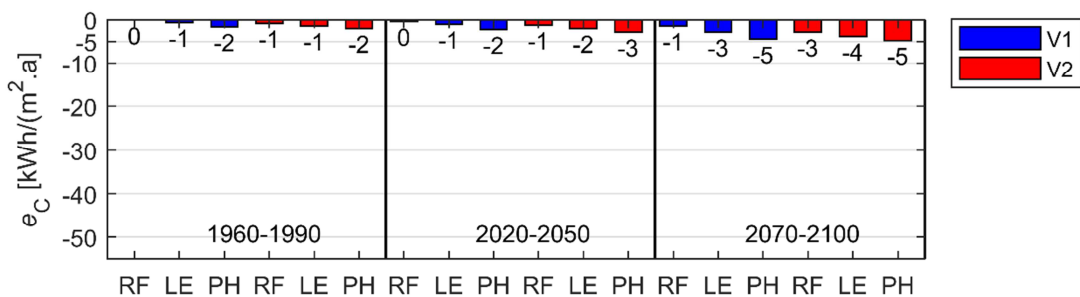
Obrázek 17: Simulace 1 – počet hodinostupňů, kdy teplota vnitřního vzduchu přesáhla 27 °C



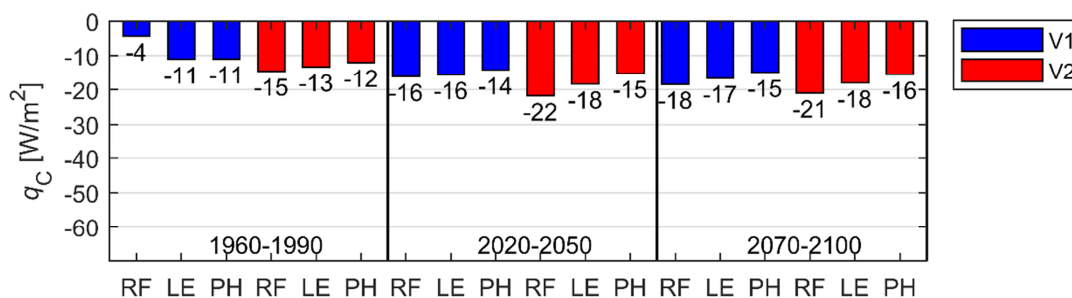
Obrázek 18: Simulace 2 - měrná potřeba tepla na chlazení



Obrázek 19: Simulace 2 - špičkový výkon chlazení



Obrázek 20: Simulace 3 - měrná potřeba tepla na chlazení



Obrázek 21: Simulace 3 - špičkový výkon chlazení

6 Diskuze výsledků

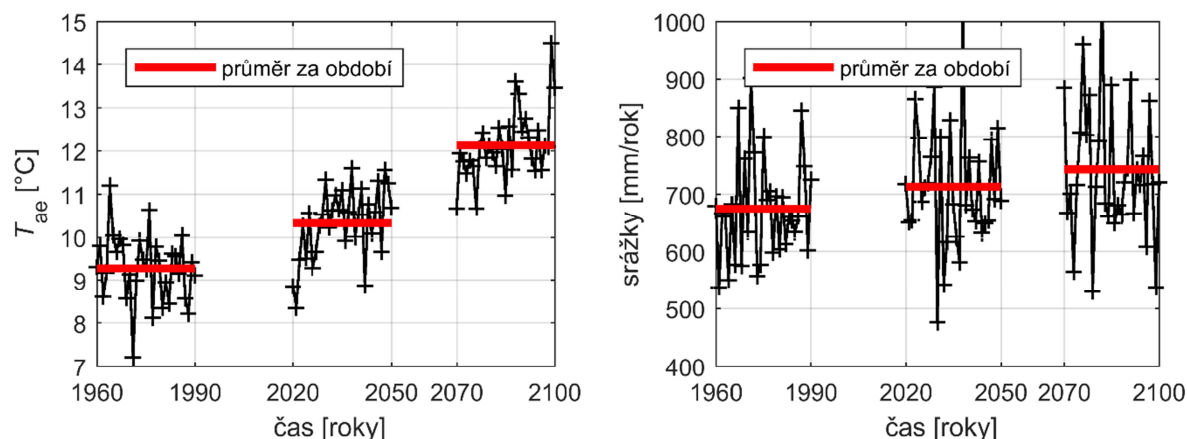
6.1 Diskuze změny klimatických podmínek pro Českou republiku

Nejprve je vhodné znovu připomenout, že nejistota předpovědi změny klimatických údajů je velmi vysoká. Není například vůbec jisté, zda dojde k naplnění předpokládaného scénáře A1B (vývoj lidské společnosti se těžko odhaduje). Existuje ale také nejistota globálního i regionálního výpočtového modelu. Složitost modelovaného systému je značná a je jisté, že matematický popis není zcela kompletní. Účelem využití modelových klimatických údajů tedy nemůže být co nejpřesnější předpověď absolutních hodnot klimatických veličin. Data spíše slouží k odhalení možných trendů v dlouhodobějším pohledu.

V budoucnosti mohou nastávat kratší a mírnější zimní období než je dnes běžné, což se mimo jiné může projevit značným poklesem počtu ledových a mrazových dnů (viz tab. 2). Prakticky to může znamenat, že z lokalit v nížinách postupně zmizí sníh. I na horách bude sněhu ubývat, přičemž se bude zkracovat rovněž období, po které bude ležet souvislá sněhová pokrývka.

V budoucnosti naopak mohou nastávat delší a teplejší období v letní polovině roku než je dnes běžné, což se mimo jiné může projevit nárůstem počtu letních dnů, tropických dnů a tropických nocí, a nárůstem maximálních denních teplot (viz tab. 2). Souběh tropických dnů a tropických nocí znamená, že období veder je pro člověka hůře snesitelné, protože jeho odpočinek v noci není kvalitní. Špatný odpočinek vede k nižší pracovní produktivitě a větší chybovosti, projevující se například zvýšením počtu dopravních nehod. V této souvislosti je také vhodné připomenout, že modelové klimatické údaje v sobě neobsahují vliv tepelného ostrova vytvořeného větším městem či urbanizovaným prostorem, které může lokální klimatické podmínky ještě značně zhoršit [15].

Pozorovaný trend zvýšení teploty venkovního vzduchu není lineární. Vzestup průměrné teploty celého časového období je vyšší mezi obdobími 2020–2050 a 2070–2100 (změna z 10,3 °C na 12,1 °C), než vzestup průměrné teploty mezi obdobími 1960–1990 a 2020–2050 (změna z 9,3 °C na 10,3 °C), viz tab. 2. Zároveň je zřejmé, že rok považovaný za výjimečně teplý v období 1960–1990, může být považovaný za teplotně podprůměrný rok v období 2070–2100, resp. rok považovaný za teplotně normální v období 1960–1990 může být v období 2070–2100 rokem naprosto výjimečně chladným (viz obr. 22, vlevo).



Obrázek 22: Meziroční proměnlivost průměrných ročních teplot a srážek během jednotlivých období (modelové údaje [7] pro Prahu, scénář A1B)

Modelové klimatické údaje taktéž naznačují, že venkovní vzduch by v budoucnosti mohl být i o něco vlhčí než dnes. Vyšší absolutní vlhkost venkovního vzduchu patrně souvisí s vyšším výparem při vyšší průměrné venkovní teplotě. Teplejší a zároveň vlhčí vzduch může znamenat, že zvládnout období veder bude obtížnější, protože potenciál pro ochlazování odparem z povrchu lidského těla bude nižší. Vlhčí vzduch zároveň může znamenat nárůst energie potřebné na jeho odvlhčení, pokud bude prováděno (viz entalpihodiny v tab. 4).

Změna vlhkostních okrajových podmínek může vést ke změně poměrů ve vlhkostní bilanci obálky budov. Například může dojít ke zvýšení zatížení obálky budovy kapalnou vodou v chladnějších obdobích roku (viz obr. 7). Změna vlhkosti vzduchu případně může vést k vlhkostním problémům ve studených prostorech větraných venkovním vzduchem, a to zejména na jaře (např. kondenzace vodní páry na spodní straně průlezného prostoru pod dřevostavbami, či na vnitřních stěnách těžkých objektů s velkou tepelnou setrvačností).

Roční úhrn srážek by se v budoucnosti mohl mírně zvyšovat. Pozorovaná tendence se zdá být logicky v souladu s vyšší měrnou vlhkostí vzduchu, resp. vyšším odpařeným množstvím. Je patrný také trend růstu intenzity srážek směrem k vyšším maximálním hodnotám, viz tab. 2, ale také trend vyšší meziroční proměnlivosti ročního úhrnu srážek (viz obr. 22, vpravo). Více srážek v ročním úhrnu ale nemusí znamenat více vody v zásobnících. Hrají roli i jiné okolnosti, jako například spotřeba vody, snížená retenční schopnost krajiny (kvalita půdy, množství zastavěných ploch), a časové rozložení srážek v průběhu roku, přičemž modely indikují sklon k častějšímu výskytu intenzivních přívaleového typu střídání suchými obdobími prakticky beze srážek.

Budovy a jejich blízké okolí mohou napomoci k šetrnému hospodaření s vodou, pokud k tomu budou uzpůsobeny. Zadržování dešťové vody v blízkosti budovy (např. v rámci zelené střechy, fasády, nebo v jezírcích či mokřadech umístěných v blízkosti budov), přítomnost stromů a rostlin v okolí budov, a snížení plochy betonu a asfaltu v okolí budov mohou pomoci zlepšit místní tepelně-vlhkostní bilanci. Skupenské teplo potřebné na následné postupné odpaření zadržené vody přispívá k ochlazení blízkého okolí, a tím i ke zlepšení teplotních podmínek v samotné budově.

6.2 Diskuze výsledků případové studie modelové budovy

Změny potřeb tepla na vytápění a chlazení a změny teploty vnitřního vzduchu byly kvantifikovány simulačním výpočtem modelového rodinného domu (dvě konstrukční varianty, tři úrovně kvality tepelné izolace obálky). Jelikož byly v simulaci použity vybrané typické roky, představují výsledky ze simulace odhad průměrných hodnot pro každé časové období. Proměnlivost potřeb tepla během časových období nebyla sledována.

Potřeba tepla na vytápění a špičkový výkon vytápění v období 2070–2100 by mohly přibližně klesnout na dvě třetiny až tři čtvrtiny v porovnání s obdobím 1960–1990. U velmi dobře tepelně izolovaných staveb bude potřeba předávat velmi nízké výkony vytápění během většiny otopné sezóny ($< 10 \text{ W/m}^2$ podlahové plochy, viz obr. 14).

Výsledky simulace 1 zobrazují zřetelnou tendenci k přehřívání v budoucnosti (viz obr. 15 až obr. 17). Stav přehřátí budovy (počet hodin, kdy je teplota vnitřního vzduchu na $27 \text{ }^\circ\text{C}$) může v budoucnu trvat po značnou část roku, a to i v případě, že solární tepelné zisky jsou redukovány stínícím systémem (viz obr. 16). Stav přehřátí může být v období 2070–2100 až čtyřnásobně četnější než v období 1960–1990.

Modelová budova s vyšší akumulací (V1) vykazovala o něco vyšší počet hodin, kdy teplota vnitřního vzduchu přesáhla $27 \text{ }^\circ\text{C}$. Modelová budova s nižší akumulací (V2) naopak dosahovala vyšších maximálních teplot (viz obr. 15) a vyššího počtu hodinostupňů nad $27 \text{ }^\circ\text{C}$, viz obr. 17.

Roční měrná potřeba tepla na chlazení nestíněného velmi dobře tepelně izolovaného domu v období 2070–2100 se přibližovala k hodnotě $40 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, viz obr. 18. Měrná potřeba tepla na chlazení nestíněné referenční varianty modelové budovy se naproti tomu pohybovala blízko hodnoty $30 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Nárůst potřeby tepla na chlazení oproti období 1960–1990 je mezi 8–47%. Nárůst je nejvýraznější u masivní referenční varianty modelového domu, nejméně výrazný je naopak u velmi dobře tepelně izolované dřevostavby.

Měrnou potřebu tepla na chlazení a měrný špičkový výkon chlazení lze do značné míry redukovat účinným stíněním (viz obr. 20 a obr. 21). Při použití systému venkovního stínění ovládaného dle předpokládaného scénáře zůstávala potřeba tepla na chlazení pod hodnotou $5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, a to i v případě velmi dobře tepelně izolovaných budov. Odpovídá to využití chladicího systému přibližně ve třech až čtyřech týdenních vlnách vedra.

Rozdíl ve špičkových výkonech chlazení mezi jednotlivými časovými obdobími není výrazný. Měrný špičkový výkon chlazení souvisí zejména s velikostí solárních tepelných zisků (vnitřní tepelné zisky byly nastaveny pro všechny varianty stejné) a příliš nesouvisí s tepelně izolační kvalitou obálky budovy (s tepelnými zisky přes neprůsvitnou část obálky). Hodnota špičkového měrného chladicího výkonu 50 W/m^2 odpovídá u modelového domu hodnotě celkového chladicího výkonu vyšší než 8 kW . O něco nižší hodnoty špičkového výkonu chlazení u pasivních domů jsou způsobeny předpokládanou nižší energetickou propustností oken (u varianty PH se předpokládalo o něco masivnější rám okna a nižší hodnota energetické propustnosti zasklení než u variant LE a RF).

6.3 Omezení platnosti výsledků

V roce 2014 byly zveřejněny nové scénáře možného vývoje koncentrací skleníkových plynů v atmosféře [4] (tzv. reprezentativní směry vývoje koncentrací, značeno jako RCP). Autoři bohužel neměli k dispozici klimatické údaje vypočtené na základě nejnovějších scénářů. Výsledky v kapitolách 4 a 5 by tedy v budoucnu měly být přepočteny pro nejnovější scénáře vývoje koncentrací skleníkových plynů.

Změny klimatických veličin byly ilustrovány na příkladu Prahy. Lze očekávat, že změny budou podobné v lokalitách v rámci České republiky ležících v nadmořské výšce nižší než 400 m n.m. Analýza klimatických změn pro lokality ve vyšších nadmořských výškách nebyla provedena.

Výsledky simulačních výpočtů tepelného chování modelové budovy jsou zatíženy nejistotami. Nejistota výsledků existuje jednak kvůli nedokonalosti samotného výpočtového modelu. V tomto ohledu je například velmi obtížné přesně předpovídat potřeby tepla na chlazení či vytápění, pokud se hodnoty přibližují k nule. Nejistota výsledků ale také existuje kvůli nepřesnosti okrajových podmínek (klimatické veličiny, obsazenost budovy a chování uživatele, atp.). Předpokládaný způsob provozu systému venkovního stínění (aktivace či deaktivace systému stínění podle úrovně vnitřní operativní

teploty) velmi zjednodušeně modeloval možné chování uživatele. Chování obyvatelů budov k systému stínění se nicméně může značně lišit, a proto může existovat značný rozptyl spotřeby tepla na chlazení (pro jinak stejnou budovu). Pro potřebu analýzy trendů však uvedené nejistoty nejsou zásadní.

Výsledky jedné případové studie (modelový rodinný dům) nelze jednoduše zobecnit. Lze však kvalifikovaně odhadnout, že trendy výstupních veličin by zůstaly podobné i pro větší bytové domy. Naopak, jiné chování mohou vykazovat budovy s výrazně odlišným charakterem provozu či odlišnými geometrickými charakteristikami (například administrativní budovy, halové stavby, školky a školy). Zhodnotit dopad změny klimatu na takové budovy by bylo potřeba provést v samostatné analýze.

7 Závěry

Tato studie analyzovala možné změny budoucích klimatických podmínek v České republice. Analýza byla založena na porovnání modelových klimatických údajů budoucnosti (období 2020–2050, resp. 2070–2100) s referenčním obdobím nedávné minulosti (1960–1990). Následná případová studie modelového rodinného domu se pokusila kvantitativně vyjádřit změny potřeb tepla na vytápění a chlazení, a teploty vnitřního vzduchu v nedaleké budoucnosti.

Hlavní pozorované trendy změny klimatických údajů jsou:

- Vzestup průměrné roční teploty venkovního vzduchu o 2–3 °C, s tím související zkrácení zimního období a prodloužení teplé části roku.
- Prodloužení souvislé délky velmi teplých období, kdy denní maximální teplota venkovního vzduchu přesáhne 30 °C.
- Zvýšení absolutní vlhkosti vzduchu.
- Malý pokles (cca o 4 %) roční dávky slunečního ozáření.
- Větší variabilita srážkových úhrnů.

Hlavní výsledky případové studie modelové budovy jsou:

- Potřeba tepla na vytápění obytných budov v budoucnu pravděpodobně klesne na přibližně dvě třetiny v porovnání s obdobím v nedávné minulosti 1960–1990.
- Pro dosahování velmi nízkých měrných potřeb tepla na vytápění bude i v budoucnosti potřeba vysoká tepelně izolační kvalita obálky budovy.
- Teplota vnitřního vzduchu v nechlazených obytných budovách se v budoucnu patrně bude stále častěji dostávat nad 27 °C (přibližně čtyřnásobný nárůst počtu hodin nad 27 °C v porovnání s nedávnou minulostí).
- Tendence k přehřívání byla viditelná u zděného modelového rodinného domu, i u dřevostavby, a zároveň byla nejsilnější u domů s vysokou tepelně izolační kvalitou obálky. Období přehřívání se v budoucnu patrně značně prodlouží, stejně tak se zvýší maximální hodnota teploty, na kterou se vnitřní prostředí v budovách během roku dostane.
- I při využití systému venkovního stínění budou v nedaleké budoucnosti existovat období, ve kterých bude teplota vnitřního vzduchu zejména ve velmi dobře tepelně izolovaných budovách překračovat 27 °C.
- Pokud budou obytné budovy vybaveny systémem venkovního stínění, a zároveň bude tento systém důsledně používán, zůstane roční měrná potřeba tepla na chlazení a měrný špičkový výkon chlazení na nízkých hodnotách (pod 5 kWh/(m²·a), resp. ≈ 15 W/m²), a to i v případě velmi dobře tepelně izolovaných budov.
- Potřeba chladit může v obytné budově s vysokou tepelně izolační kvalitou obálky i s důsledně používaným systémem venkovního stínění v budoucnosti nastávat až v 1200 hodinách za rok.

Další související závěry jsou:

- Potřeba tepla na vytápění a chlazení obytných budov s velmi vysokou tepelně izolační kvalitou obálky a funkčním systémem stínění dosahuje i v budoucnu velmi nízkých hodnot (< 10 kWh/(m²a)). Provozování takových budov tedy má velmi nízký dopad na životní prostředí. Nárůst teploty spojený se změnou klimatu tedy nepředstavuje argument pro snižování požadavků na tepelně izolační kvality obálky budovy.
- Potřeba tepla na vytápění a chlazení obytných budov s vysokou tepelně izolační kvalitou obálky a funkčním systémem stínění dosahuje řádově obdobných hodnot. I přes oteplení bude vytápění v takových budovách o něco větší položkou (z pohledu ročních potřeb). Bez účinného systému stínění by však potřeba tepla na chlazení v budoucnu několikanásobně převýšila potřebu tepla na vytápění.
- Důležitou roli v omezení přehřívání může sehrát noční větrání budovy. Popis koncepce větrání budovy (nejen nočního) by měl být nedílnou součástí projektové dokumentace.
- Pokud budou na střeše, fasádě či v těsné blízkosti budovy umístěny fotovoltaické kolektory, existuje časový souběh produkce elektřiny ze slunce a potřeby tepla na chlazení.
- Předchozí bod představuje logický argument k využití tepelného čerpadla pro vytápění i chlazení (reverzní chod tepelného čerpadla).

Poděkování: Tento článek vznikl za finanční podpory MŠMT v rámci programu NPU I č. LO1605 – Univerzitní centrum energeticky efektivních budov – Fáze udržitelnosti a projektu TAČR TH 03030230.

Literatura

- [1] <https://climate.nasa.gov/evidence/>
- [2] <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/zmena-klimatu/zakladni-informace#>
- [3] <http://www.climatewizard.org>
- [4] <http://www.ipcc.ch/>
- [5] STANĚK, K., přednáška k předmětu Dřevostavby, http://kps.fsv.cvut.cz/file_download.php?fid=7674, dostupné pouze studentům ČVUT, FSv, po přihlášení
- [6] EU projekt Climate for Culture, <https://www.climateforculture.eu>, klimatické údaje laskavě poskytl Jos van Schijndel z Technické Univerzity v Eindhovenu
- [7] model REMO, <https://www.remo-rcm.de/059966/index.php.en>
- [8] Matlab a Simulink, <https://www.mathworks.com/>
- [9] KOPECKÝ, P., SOJKOVÁ, K., O přiměřeném prosklení administrativních budov, Vytápění, Větrání, Instalace, 3/2018
- [10] Denní klimatické údaje pro Prahu Libuš z období 1971-2017, dostupné z webu ČHMU, <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/denni-data#>
- [11] Software Meteonorm, www.meteotest.ch,
- [12] Typical meteorological year TMY, user's manual TD - 9763, National Climatic Center Asheville, North Carolina, 1981.
- [13] STANĚK, K., Fotovoltaika pro budovy, GRADA, 2012.
- [14] SOJKOVÁ, K. Potřeba tepla na vytápění a letní tepelná stabilita – rozdíly v závislosti na užívání budovy. In: Simulace budov a techniky prostředí. Praha, 8.–9.11.2010. Praha: IBPSA-CZ. 2010, s. 49–53. ISBN 978-80-254-8661-0.
- [15] ASIMAKOPOULOS, D., N., Energy and Climate in Urban Built Environment, Earthscan, 2001.

Přílohy

Tabulka 7: Tepelně-technické vlastnosti stavebních prvků (varianta V1)

Číslo	Název	Tloušťka d (m)	Součinitel tepelné vodivosti (W/(m·K))	Objemová hmotnost (kg/m ³)	Měrná tepelná kapacita (J/(kg·K))	Pohltivost pro krátkovlnné záření (-)	Emisivita (-)
Venkovní stěna							
1	Vnitřní omítka	0.01	0.80	1500	1000		0.90
2	Zdivo z vylehčených keramických tvarovek	0.25	0.36	1000	1000		
3	Pěnový polystyren	0,10/0,13 /0,24	0.04	30	1000		
4	Venkovní omítka	0.006	0.80	1500	1000	0.40	0.90
Střecha							
1	Vnitřní omítka	0.01	0.80	1500	1000		0.90
2	Strop z keramických tvarovek	0.19	0.80	1000	1000		
3	Beton	0.06	1.3	2200	1000		
4	Asfaltový pás	0.004	0.17	1300	1500		
5	Pěnový polystyren	0,15/0,21 /0,30	0.040	30	1000		
6	Asfaltový pás	-	-	-	-	0.90	0.90
Podlaha na zemině							
1	Dřevo	0.015	0.18	600	2000		0.90
2	Cementový potěr	0.05	1.2	2100	1000		
3	Adiabatická vrstva						
Vnitřní nosná stěna							
1	Vnitřní omítka	0.01	0.8	1500	1000		0.90
2	Zdivo z keramických tvarovek	0.30	0.26	900	1000		
3	Vnitřní omítka	0.01	0.8	1500	1000		0.90
Příčky							
1	Vnitřní omítka	0.01	0.8	1500	1000		0.90
2	Zdivo z keramických tvarovek	0.115	0.26	900	1000		
3	Vnitřní omítka	0.01	0.8	1500	1000		0.90
Strop (zespoda směrem nahoru)							
1	Omítka	0.01	0.8	1500	1000		0.90
2	Strop z keramických tvarovek	0.19	0.8	1000	1000		
3	Beton	0.06	1.3	2200	1000		
4	Minerální vlna	0.04	0.040	100	1000		
5	Cementový potěr	0.04	1.2	2100	1000		
6	Dřevěná podlaha	0.015	0.18	600	2000		0.90

Tabulka 8: Tepelně-technické vlastnosti stavebních prvků (varianta V2)

Číslo	Název	Tloušťka a d (m)	Součinitel tepelné vodivosti (W/(m·K))	Objemová hmotnost (kg/m ³)	Měrná tepelná kapacita (J/(kg·K))	Pohltivost pro krátkovlnné záření (-)	Emisivita (-)
Venkovní stěna							

1	Sádrokarton	0.0125	0.22	700	1000		0.90
2	Tepelná izolace z dřevěných vláken	0.06	0.06	63	2000		
3	OSB deska	0.015	0.13	600	2000		
4	Tepelná izolace (celulóza)	0.10/0,1 25/0,24	0.06	76	2000		
5	DHF deska	0.015	0.13	600	2000		
6	Venkovní omítka	0.006	0.8	1500	1000	0.40	0.90
Střecha							
1	Sádrokarton	0.0125	0.22	700	1000		0.90
2	Tepelná izolace z dřevěných vláken	0.04	0.06	63	2000		
3	Parozábrana	-	-	-	-		
4	OSB deska	0.015	0.13	600	2000		
5	Tepelná izolace (celulóza)	0.11/0,1 45/0,26	0.056	76	2000		
6	OSB deska	0.022	0.13	600	2000		
7	Pěnový polystyren	0.06	0.037	30	1000		
8	Asfaltový pás	-	-	-	-	0.90	0.90
Podlaha na zemině							
1	Dřevo	0.015	0.18	600	2000		0.90
2	Cementový potěr	0.05	1.2	2100	840		
3	Adiabatická vrstva						
Vnitřní nosná stěna							
1	Sádrokarton	0.0125	0.22	700	1000		0.90
2	OSB deska	0.015	0.13	600	2000		
3	Tepelná izolace (celulóza)	0.20	0.1	80	2000		
4	OSB deska	0.015	0.13	600	2000		
5	Sádrokarton	0.0125	0.22	700	1000		0.90
Příčky							
1	Sádrokarton	0.0125	0.22	700	1000		0.90
2	Tepelná izolace (celulóza)	0.20	0.10	80	2000		
3	Sádrokarton	0.0125	0.22	700	1000		0.90
Strop (zespoda směrem nahoru)							
1	Sádrokarton	0.0125	0.22	700	1000		0.90
2	Minerální vlna	0.10	0.10	100	1000		
3	Vzduchová dutina	0.10	0.50	10	1000		
4	OSB board	0.021	0.13	600	1800		
5	Minerální vlna	0.04	0.04	100	1000		
6	OSB deska	0.036	0.13	600	1800		
7	Dřevěná podlaha	0.015	0.18	600	2000		0.90

Tabulka 9: Tepelně-technické parametry zasklení

Varianta	Typ zasklení	U [W/(m ² K)]	g [-] pro kolmý dopad
RF	Dvojsklo	1,5	0,66
LE	Dvojsklo	1,0	0,60
PH	Trojsklo	0,7	0,50