



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

# VYUŽITÍ REFERENČNÍHO KLIMATICKÉHO ROKU PRO HODNOCENÍ A NÁVRH TERMICKÉHO SOLÁRNÍHO SYSTÉMU

EFFICIENCY TEST REFERENCE YEAR FOR THE EVALUATION AND DESIGN OF SOLAR  
THERMAL SYSTEM

## DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Petr Jelínek

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Sedlák, CSc.

BRNO 2019

## **Abstrakt**

Disertační práce řeší využití referenčního klimatického roku pro návrh a hodnocení solárního termického systému. Hodnocení probíhalo na solárním termickém systému pasivního rodinného domu v obci Rapotice. Systém byl dlouhodobě monitorován a bylo prováděno dlouhodobé simultánní měření vnitřních i venkovních okrajových podmínek. Naměřená data byla porovnávána jak s referenčním klimatickým rokem, tak i s daty databáze Meteonorm. Vybrané okrajové podmínky solárního termického systému byly porovnány pomocí numerických simulací v programu Polysun a následně statisticky analyzovány. Výsledky simulací s využitím referenčního klimatického roku dosahují větší shodu s měřeními na stavbě, než data z Meteonormu. Referenční klimatický rok se na základě výsledků jeví jako nejvhodnější databáze klimatických dat na našem území pro návrh solárního termického systému.

## **Klíčová slova**

Referenční klimatický rok, Meteonorm, Polysun, solární termický systém, numerická simulace

## **Abstract**

This thesis describes utilisation of test reference year for design and evaluation of solar thermal system. The evaluation was performed on a solar thermal system of a single-family house in Rapotice, Czechia. Long-term monitoring of the system as well as indoor and outdoor climate were performed there. Measured data were compared with test reference year and data in Meteonorm database. Selected boundary conditions of the solar thermal system were compared with numerical simulations in Polysun. The results of the comparison were statistically analysed. Results of the simulations utilizing test reference year were closer to the on-site measurements than dates from Meteonorm. Therefore it could be concluded that test reference year is the best database of climate data for design of solar thermal system in Czechia.

## **Key words**

Test reference year, Meteonorm, Polysun, solar thermal system, numerical simulation

**Bibliografická citace:**

Ing. Petr Jelínek *Využití referenčního klimatického roku pro hodnocení a návrh termického solárního systému*. Brno, 2019. 113 s., 8 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Sedlák, CSc.

**Poděkování:**

Rád bych poděkoval svému školiteli doc. Ing. Jiřímu Sedlákovi, CSc. za jeho odborné vedení a za trpělivost nejen při zpracování této práce.

Poděkování také patří rodině Valehrachovým, kteří mě uvítali u sebe doma a vyšli mně vždy vstříc. Moc děkuji rodině, kamarádům a kolegům z práce, kteří pomáhali nejen podporou, ale i cennou radou a svojí trpělivostí.

Všem moc děkuji.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem Využití referenčního klimatického roku pro hodnocení a návrh termického solárního systému zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 3.1 2019

.....  
Ing. Petr Jelínek

autor práce

## OBSAH

OBSAH .....	6
A ÚVOD .....	9
B SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	11
B.1 Sluneční záření .....	11
B.1.1 Zdroj energie .....	11
B.1.2 Solární konstanta a extraterestrální insolace.....	11
B.1.3 Radiační bilance zemského povrchu .....	13
B.1.4 Vlivy na sluneční záření při průchodu atmosférou .....	14
B.2 Základní složky slunečního záření a způsoby jejich měření.....	16
B.2.1 Globální záření .....	16
B.2.2 Přímé záření.....	17
B.2.3 Difúzní záření .....	18
B.2.4 Modely výpočtu difúzní složky globálního záření.....	20
B.2.5 Měření slunečního záření na našem území.....	21
B.2.6 Dlouhodobé změny globálního záření na našem území.....	22
B.3 Solární termické systémy .....	23
B.3.1 Vývoj solárních termických systémů.....	23
B.3.2 Stav solárních termických systémů ve světě .....	25
B.3.3 Stav solárních termických systémů v ČR .....	26
B.3.4 Konstrukční řešení malých solárních termických systémů .....	26
B.3.5 Způsob provozu solární termické soustavy .....	27
B.3.6 Solární termické kolektory .....	29
B.3.7 Solární zásobníky .....	30
B.4 Návrh solárního termického systému .....	32
B.4.1 Dle zkušeností .....	32
B.4.2 Zjednodušené výpočetní postupy .....	32
B.4.3 Numerické simulace .....	35
B.5 Klimatická data.....	38
B.5.1 Databáze klimatických dat.....	40
B.5.2 Referenční klimatický rok dle ČSN EN ISO 15927-4.....	42

B.5.3	Meteonorm .....	44
C	CÍLE PRÁCE .....	47
C.1	Specifikace cílů práce .....	47
C.2	Prostředky pro dosažení cílů.....	47
C.3	Důvody volby cílů.....	48
D	MATERIÁL A METODIKA.....	49
D.1	Výběr vhodného objektu .....	49
D.1.1	Objekt RD v Rapoticích .....	49
D.1.2	Solární termický systém RD v Rapoticích.....	51
D.1.3	Monitoring solárního termického systému .....	52
D.1.4	Monitoring vnitřního prostředí budovy .....	54
D.2	Měření vybraných klimatických parametrů na RD .....	55
D.2.1	Monitoring venkovního prostředí .....	55
D.2.2	Monitoring globálního slunečního ozáření .....	56
D.2.3	Model výpočtu difuzní složky globálního záření .....	57
D.3	Software pro numerickou simulaci .....	58
D.3.1	Klimatická data pro numerické simulace .....	59
D.4	Statistická analýza .....	60
E	VÝSLEDKY A DISKUZE.....	62
E.1	Monitorování solárního termického systému, vnitřního prostředí a klimatických podmínek na vybraném objektu.....	62
E.1.1	Monitoring solárního termického systému .....	62
E.1.2	Měření vnitřního prostředí RD .....	66
E.1.3	Měřené klimatické podmínky RD .....	67
E.1.4	Model výpočtu difuzní složky globálního záření .....	70
E.2	Porovnání GLB jednotlivých klimatických roků použitých v numerických simulacích.....	73
E.3	Numerická simulace solárního termického systému pro různé okrajové podmínky .....	77
E.3.1	Model systému .....	77
E.3.2	Kontrola numerické simulace .....	78
E.3.3	Porovnání variant klimatických roků 2013/2014 .....	79
E.3.4	Porovnání variant klimatických roků 2014/2015 .....	84

E.4	Statistické porovnání měření a numerických simulací solárního termického systému .....	86
E.4.1	Roční statistické porovnání .....	87
E.4.2	Měsíční statistické porovnání .....	88
F	ZÁVĚR.....	93
G	MOŽNOST NAVAZUJÍCÍHO VÝZKUMU .....	96
H	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	97
H.1	Literatura .....	97
H.2	Ostatní zdroje.....	103
H.3	WWW zdroje .....	105
I	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	108
J	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	110
K	SEZNAM TABULEK .....	113
L	PŘÍLOHY .....	114
L.1	Průběh Extraterestrální insolace .....	114
L.2	Technika pro měření slunečního záření .....	114
L.3	Seznam a popis měření stanic Radiační sítě ČHMÚ .....	115
L.4	Seznam stanic RKR pro výpočet parametrů slunečního záření .....	116
L.5	Solární termické kolektory a jejich parametry v Rapoticích .....	117
L.6	Solární akumulční zásobník v Rapoticích .....	118
L.7	Měřicí technika klimatických parametrů v Rapoticích .....	119
L.8	Postup výpočtu popisovaných separačních modelů difúzního záření .....	120
L.9	Porovnání závislostí $k_d$ na $k_t$ u modelů BRL a Reindl1 .....	121

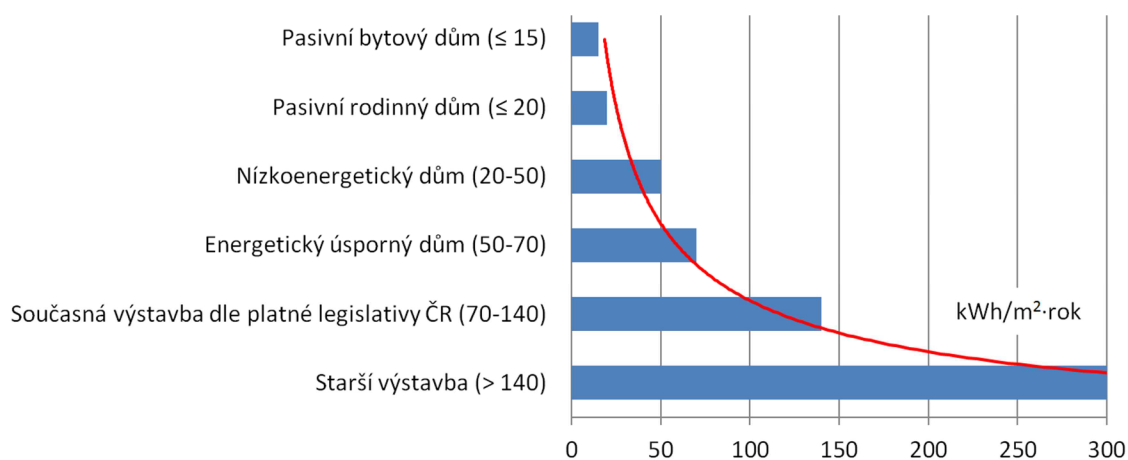


## A ÚVOD

S technologickým pokrokem a rozvojem průmyslu po 2. světové válce rychle rostla spotřeba nerostných surovin. Závislost na této komoditě se silně projevila během 1. a 2. ropné cenové krize v 70. letech 20. století, které vyvolaly nejistotu a ekonomickou stagnaci (Quaschnig, 2010). V roce 1972 vydal Římský klub svoji zprávu - Meze růstu, kde upozorňoval na řadu problémů lidstva včetně přelidnění, znečištění životního prostředí, vyčerpání přírodních zdrojů, růstu životní úrovně a s tím spojených zvyšujících se energetických nároků (Meadows, 1972).

Všechny tyto události a mnoho dalších vedly k celé řadě mezinárodních smluv a dohod - Kjótský protokol, Pařížská dohoda a další, které se snaží dílčí problémy řešit v celosvětovém měřítku. V rámci EU jsou úsporné strategie v budovách řešeny prostřednictvím směrnic Evropského parlamentu a Rady o energetické náročnosti budov - tzv. EPBD. V roce 2018 vyšla již 3. směrnice pod označení 2018/844/EU (EPBD III, 2018) formou změnového předpisu současně dvou stávajících směrnic - 2010/31/EU (EPBD II, 2010) a 2012/27/EU (Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2012/27/EU, 2012). Dle EPBD II budou od 1.1 2021 všechny nové budovy postaveny s téměř nulovou spotřebou energie a tato energie by měla být ve značném rozsahu pokryta z OZE.

Na Obr. 1 je patrné, jaký prodělaly budovy za několik posledních desítek let v důsledku hledání energetických úspor vývoj v oblasti snížení spotřeby energie na vytápění.



Obr. 1 - Orientační rozdělení obytných budov podle měrné potřeby energie na vytápění na území ČR (ČSN 73 0540-2, 2011)

Nynější spotřeby energie na vytápění u nových budov jsou na takové úrovni, že z hlediska energetických úspor je třeba se také zaměřit na ostatní spotřeby v budově (ohřev teplé vody, osvětlení, chlazení apod.). Dle Českého statistického úřadu bylo v roce 2015 17,4 % energie spotřebovaných v budovách pro bydlení použito na ohřev teplé vody (Spotřeba paliv a energií v domácnostech, 2017). Problematika energetických úspor u ohřevu teplé vody spočívá v tom, že samotný uživatel budovy je ochoten provést řadu úsporných opatření z hlediska vytápění (zateplení budovy, nucené větrání apod.), ale není již ochoten přirozeně šetřit při spotřebě teplé vody, jelikož si chce dopřát dostatečnou životní úroveň.

V ČR se v rámci energetických úspor ohřevu teplé vody nejvíce využívají tyto varianty řešení (Smola, 2011):

- mechanické opatření - úsporné výtokové baterie, perlátory apod;
- zkrácení a dostatečná tepelná izolace rozvodů TV;
- používání zdrojů tepla s vyšší účinností;
- využívání OZE.

Globální rozvoj OZE v novém tisíciletí je zapříčiněn především rychlým snižováním finančních nákladů na vybudování a rostoucí elektrifikací společnosti. Oproti roku 2010 se náklady na baterie snížily o 40 % a na fotovoltaické panely o 70 % (World Energy Outlook 2018, 2017). Snížení finančních nákladů je tak výrazné, že se již některé OZE stali výhodnější než stávající velké energetické projekty dle analytické studie newyorské investiční banky Lazard (Lazard, 2018).

Nevýhodou některých OZE je jejich klimatická závislost a tedy proměnlivá výroba energie. Z důvodu finanční návratnosti OZE je potřeba stanovit co nejpřesněji předpokládaný výnos systému a k tomu potřebujeme znát informace o klimatických podmínkách v dané lokalitě. S výhodou se pro to používají klimatické roky, které jsou sestavené tak, aby reprezentovaly dlouhodobý trend klimatu v dané lokalitě. Klimatické roky se kromě návrhu mohou použít i pro zpětné hodnocení systému OZE a k jejich následné optimalizaci, pokud nejsou k dispozici místní měření klimatických podmínek.

## B SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

### B.1 Sluneční záření

#### B.1.1 Zdroj energie

Termojaderné procesy probíhající v centrální oblasti Slunce jsou zdrojem obrovského množství energie, které slunce vyzařuje v podobě elektromagnetického záření do meziplanetárního prostoru. Teplota centrální části Slunce dosahuje  $15 \cdot 10^6$  K a průchodem přes radiální zónu až ke slunečnímu povrchu fotosféry se sníží na 5 777 K (Günther, 2013).

Hustotu toku energie vyzařovaného z povrchu Slunce lze stanovit pomocí Stefan-Boltzmannova zákona. Záření slunce můžeme přiblížit k záření dokonale černého tělesa se stejnou povrchovou teplotou jako slunce (Vrtek, 2012):

$$I(T) = \int_0^{\infty} I_{\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \sigma \cdot T^4 = 5,66961 \cdot 10^{-8} \cdot 5\,777^4 \quad \text{R.1}$$

$$= 6,315 \cdot 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \doteq 63 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$$

Kde  $I(T)$  Intenzita záření slunce (černého tělesa), [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]  
 $\sigma$  Stefan-Boltzmannova konstanta [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ]  
 $T$  Termodynamická teplota [K]

#### B.1.2 Solární konstanta a extraterestrální insolace

Vezmeme-li Slunce jako dokonalou kouli, tak záření se šíří všemi směry a tím se rozptyluje do prostoru. Při několika zjednodušeních, zanedbání eliptického pohybu Země kolem Slunce a velikosti Země, můžeme stanovit intenzitu ozáření na vnější obal atmosféry Země (solární konstanta). Za těchto podmínek lze použít energetickou bilanci vycházející z celkové energie vyzářené povrchem Slunce, která se musí rovnat energii, jež musí projít kulovou plochou o poloměru odpovídajícímu vzdálenosti Země od Slunce (Vrtek, 2012):

$$4 \cdot \pi \cdot r_{\text{Slunce}}^2 \cdot I_{\text{Slunce}} = 4 \cdot \pi \cdot r_{\text{AU}}^2 \cdot I_{\text{SC}} \quad \text{R.2}$$

$$I_{\text{SC}} = \frac{r_{\text{Slunce}}^2}{r_{\text{AU}}^2} \cdot I_{\text{Slunce}} = \frac{(696 \cdot 10^6)^2}{(149,59 \cdot 10^9)^2} \cdot 63 \cdot 10^6 \doteq 1\,364 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Kde	$r_{Slunce}$	poloměr slunce [m]
	$r_{AU}$	střední vzdálenost Země od Slunce, tzv. astronomická jednotka AU [m]
	$I_{SC}$	sluneční ozáření na kulové ploše $r_{AU}$ - Solární konstanta [ $W \cdot m^{-2}$ ]

V roce 1981 WMO na základě dlouhodobého družicového a přímého měření z období 1969 až 1981 stanovilo průměrnou hodnotu solární konstanty,  $I_{SC} = 1\,367\, W \cdot m^{-2}$  s nejistotou  $\pm 7\, W \cdot m^{-2}$  (WMO, 1982)

Extraterestrální insolace je oslunění horní hranice atmosféry Země sluncem s měnícími se okrajovými podmínkami. Je ovlivněno proměnlivou vzdáleností těchto dvou těles a výkyvy ve výkonu slunce (sluneční skvrny apod.). Pro technické účely ale můžeme vliv výkonu slunce zanedbat z důvodu malého kolísání ve výši  $\pm 0,2\%$  a nižší.

Vzdálenost mezi Sluncem a Zemí je proměnlivá vlivem eliptické oběžné dráhy Země. Tento pohyb je předvídatelný, dá se tedy popsat vliv (Duffie, 2013).

Pro běžné výpočty je možné použít tvar:

$$I_{ext} = I_{sc} \cdot \left( 1 + 0,033 \cdot \cos \frac{360 \cdot n}{365} \right) \quad R.3$$

Pro přesnější výpočty byla odvozena rovnice s přesností  $\pm 0,01\%$  (Spencer, 1971):

$$I_{ext} = I_{sc} \cdot \left( \frac{R_{av}}{R_n} \right)^2 \quad R.4$$

$$\begin{aligned} \left( \frac{R_{av}}{R_n} \right)^2 = & 1,00011 + 0,034221 \cdot \cos(b) + 0,00128 \\ & \cdot \sin(b) + 0,000719 \cdot \cos(b) \\ & + 0,000077 \cdot \sin(b) \end{aligned} \quad b = 2\pi \cdot \frac{n}{365} \text{ radians}$$

Kde	$I_{sc}$	solární konstanta [ $W \cdot m^{-2}$ ]
	$R_{av}$	průměrná vzdálenost mezi Sluncem a Zemí
	$R_n$	vzdálenost mezi Sluncem a Zemí v závislosti na dni v roce
	$n$	den v roce (1-365)

Roční režim extraterestrální insolace se nazývá solární klima a výkyvy jsou v rozmezí  $\pm 3,3 \%$  (Příloha L.1).

### B.1.3 Radiační bilance zemského povrchu

Z celkové energie, kterou Slunce vyzařuje, dopadne na Zemi jen nepatrná část, asi  $1,8 \cdot 10^{14}$  kW (Kleczek, 1981). Na Obr. 2 je znázorněna radiační (někdy také nazývána energetická) bilance zemského povrchu. Sluneční záření, které není absorbováno či odraženo atmosférou a zemským povrchem, je absorbováno a zpětně vyzářeno zemským povrchem v podobě infračerveného (nad  $3,0 \mu\text{m}$ ) záření a následně částečně zachyceno zemskou atmosférou. Tato bilance je v rovnováze (při zanedbání nepatrného vlivu jiných energetických zdrojů - geotermální, slapové a další), ale ne zcela. Na nerovnováhu bilance má velký vliv oblačnost a změny povrchu Země.

Sluneční záření  $\div$  záření odražené od mraků a atmosféry +  
záření odražené od zemského povrchu + infračervené záření

R.5



Obr. 2 - Radiační bilance zemského povrchu, hodnoty v % (Radiační bilance zemského povrchu, 2017)

### B.1.4 Vlivy na sluneční záření při průchodu atmosférou

Sluneční vyzařování je proměnlivé. Je to způsobeno nestálou teplotou povrchu, změnami ve fotosféře Slunce (sluneční skvrny) atd. Z těchto důvodů nemá Slunce tak dokonale hladký průběh intenzity spektrálního vyzařování jako absolutně černé těleso (Günth, 2013). Průběh referenční WRC křivky intenzity spektrálního vyzařování Slunce na hranici atmosféry byl stanoven tak, aby výsledný vyzařovaný výkon, neboli celková intenzita záření byla rovna Solární konstantě  $I_{SC} = 1\,367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Toto spektrum je složeno z několika částí dle vlnových délek, podrobněji se tomu věnuje publikace (Wehrli, 1985), ve které bylo spektrum poprvé uveřejněno. 97% sluneční energie dopadá v rozmezí vlnových délek 0,29 až 3,00  $\mu\text{m}$  (WMO, 2014).

Existuje řada vlivů, které ovlivňují velikost slunečního ozáření na zemský povrch. Máme 2 základní vlivy:

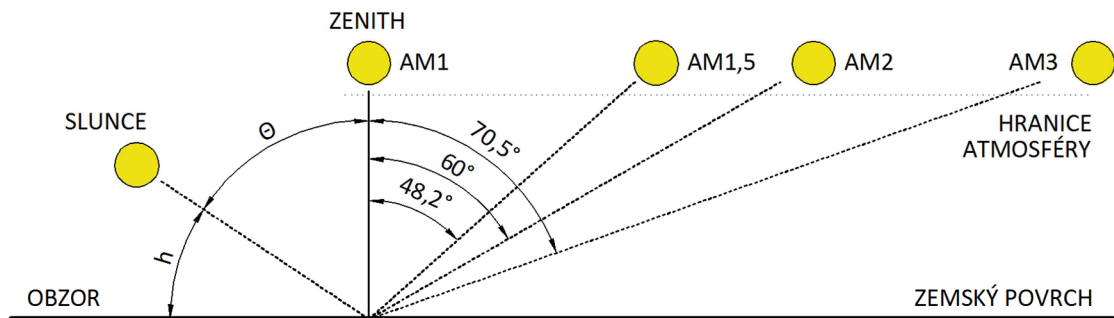
**Atmosférický rozptyl** - je způsoben interakcí slunečního záření s molekulami vzduchu, aerosoly a vlhkosti ve vzduchu a zejména oblačností. Problematiku rozptylu je možné popsat pomocí Rayleighova rozptylu či Ångströmovy rovnice zakalení oblohy v publikaci (Duffie, 2013 a Mecherikunnel, 1980).

Atmosférický rozptyl zohledňujeme pomocí optické tloušťky atmosféry AM a je dán geografickou polohou a časem. Stejně jako byla stanovena referenční křivka WRC pro sluneční záření na hranici atmosféry (označeno AM0), byly stanoveny další referenční křivky intenzity spektrálního vyzařování Slunce pro různé AM na hladině moře. Na základě mezinárodní úmluvy jsou referenční spektra definovaná pro zenitové úhly  $0^\circ$ ;  $48,2^\circ$ ;  $60^\circ$ ;  $70,2^\circ$  a od toho se po přepočtu R.6 odvíjí jejich označení AM1, AM1.5, AM2 a AM3. Tato referenční spektra nám slouží k výpočtům intenzity slunečního záření v různé nadmořské výšce. Nutno zdůraznit, že tato referenční spektra slunečního záření platí pro průchod bezoblačnou atmosférou (Vrtek, 2012).

$$AM = \frac{1}{\sin h} = \frac{1}{\cos \theta} \quad [-] \quad \text{R.6}$$

Kde  $h$  Výška slunce nad obzorem, [rad nebo  $^\circ$ ]  
 $\theta$  Zenitový úhel slunce, [rad nebo  $^\circ$ ]

Na Obr. 3 jsou v levé části graficky znázorněny úhly, které slouží k výpočtu AM. V pravé části jsou uvedena referenční spektra AM pro definované zenitové úhly.



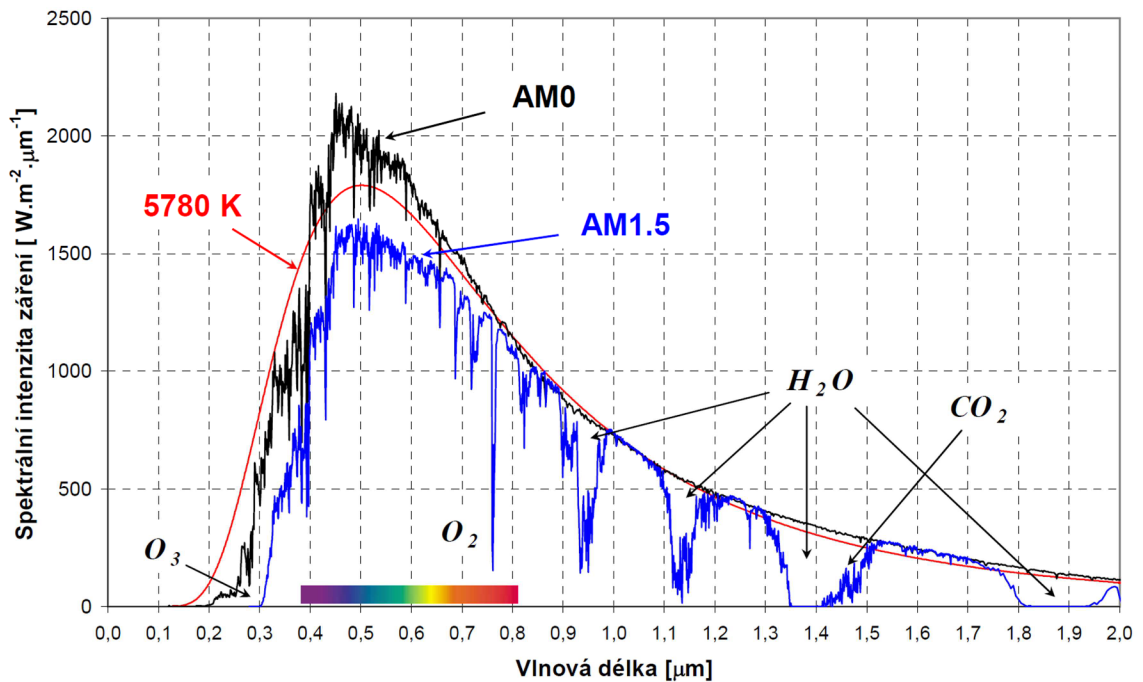
Obr. 3 - **Levá část:** výška slunce nad obzorem ( $h$ ) a zenitový úhel ( $\Theta$ ), **Pravá část:** Označení referenčních spekter pro různé pozice Slunce na obloze zadané zenitovým úhlem

**Atmosférická absorpce** – je způsobena absorpcí slunečního záření prvky a látkami v zemské atmosféře. Jedná se především o ozón, vodní páru, kyslík, oxid uhličitý a jednotlivé prvky působí převážně na různých vlnových délkách. Při vlnových délkách kratších než  $0,29 \mu\text{m}$  způsobí ozón téměř úplnou absorpci záření. Při vlnových délkách delších než  $2,50 \mu\text{m}$  kombinace nízké extraterestrální insolace a silné absorpce oxidu uhličitého způsobí, že na zemský povrch dopadne jen velmi málo energie. Z těchto důvodů je nutné se zaměřit na využití slunečního záření pouze v rozsahu vlnových délek od  $0,29$  do  $2,50 \mu\text{m}$  (Duffie, 2013).

Z Obr. 4 je patrné, že spektrální křivky vyzařování absolutně černého tělesa a referenční křivka WRC AM0 nejsou totožné z důvodů uvedených na začátku této kapitoly. Referenční spektrum AM1,5 definuje běžné záření ve střední Evropě a Severní Americe (zenitový úhel  $48,2^\circ$ ). Bývá používáno v solární energetice pro testování solárních panelů. Celková intenzita záření spektra AM1.5 je  $1\,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Rozdíly mezi křivkami AM0 a AM1.5 jsou způsobeny útlumem slunečního záření při průchodu atmosférou zaviněným atmosférickou absorpcí (Vrtek, 2012).

Pro člověka je viditelný pouze malý úsek vlnových délek (IEA, 1987). Dolní mez viditelnosti je v rozmezí  $0,34$  až  $0,40 \mu\text{m}$  a horní mez je  $0,76$  až  $0,83 \mu\text{m}$ .

Vlnové délky kratší než 0,40  $\mu\text{m}$  se nazývají infračervené záření a větší než 0,80  $\mu\text{m}$  ultrafialové záření (IEC, 1987).



Obr. 4 - Spektrální charakteristika zářivého slunečního toku pro různá referenční spektra (Vrtek, 2012)

Kde	5 780 K	Spektrum vyzařování absolutně černého tělesa
	AM0	Standardní spektrální ozařovací křivka dle WRC na hranici atmosféry
	AM1,5	Spektrální ozařovací křivka odpovídající střední Evropě na hladině moře
	H <sub>2</sub> O	Ztráty absorpcí způsobené vodní parou (obdobně O <sub>3</sub> , O <sub>2</sub> a CO <sub>2</sub> )

## B.2 Základní složky slunečního záření a způsoby jejich měření

### B.2.1 Globální záření

Při průchodu zemskou atmosférou je sluneční záření pohlcováno, odraženo a rozptylováno atmosférickými plyny, aerosoly a oblačností. Část záření tak z oblohy přichází ve formě rozptýleného difúzního slunečního záření, které nemá směrový charakter (izotropní záření). Sluneční záření, které projde atmosférou bez rozptýlení, označujeme jako přímé sluneční záření a má výrazný směrový charakter. Sluneční záření dopadající na zemský povrch



se vlivem albeda odráží zpátky do prostoru. V přírodě se ale převážně vyskytují difúzní povrchy, které způsobují všesměrový odraz se zhruba stejnou intenzitou. Země jako celek má průměrnou hodnotu albeda v rozmezí 0,29 až 0,34. V případě lidských sídel je nutné zohlednit velké odrazivé plochy (Strahler, 2011 a Matuška, 2013).

Rovnice R.7 nám definuje vztah celkového slunečního ozáření, nazývaného globální, dopadajícího na obecně orientovanou a skloněnou plochu (Vrtek, 2012):

$$I = I_b + I_d + I_r \quad \text{R.7}$$

Kde	$I$	Globální sluneční ozáření, [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
	$I_b$	Přímé sluneční ozáření, [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
	$I_d$	Difúzní sluneční ozáření, [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
	$I_r$	Difúzní ozáření odražené od zemského povrchu, [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

Sluneční záření se měří radiometry, které se dělí na pyrhelimetry a aktinometry, měřící přímé záření a na pyranometry používané k měření globálního záření, difúzního záření nebo záření odraženého zemským povrchem.

### B.2.2 Přímé záření

Pro měření přímého slunečního záření se používá Pyrhelimetr nebo Aktinometr (Obr. 5). Používají se 2 základní typy pyrhelimetrů - Abbotův vodní a Ångströmův kompenzační, které byly vyvinuty již na přelomu 19. a 20. století (Vaníček, 2015). Základním principem měření je, že na patě dostatečně dlouhé kolimáčnické trubice s malým zorným úhlem  $5,7^\circ$  je umístěna absorpční destička s termočlánkem, která vlivem ozáření zvyšuje svojí teplotu. Ve stíněné komoře pyrhelimetru je umístěna druhá destička s termočlánkem, která je vyhřívána přesně měřeným elektrickým proudem na stejnou teplotu. Intenzita přímého záření je tak určena jako ekvivalent energie potřebné k zahřátí stíněné destičky. Pro dlouhodobější měření je nutné zařízení stále orientovat na slunce, např. pomocí automatických solárních sledovacích systémů (Příloha L.2). Pyrhelimetry jsou normálovými přístroji (etalony) pro měření slunečního záření, podle kterých se kalibrují přístroje.

Aktinometry pracují na obdobném principu. Místo zahřívající destičky či pásku je ale použit bimetalový pásek, u kterého se měří deformace nebo elektrické napětí vzniklé termoelektrickým článkem (Vaníček, 2015).



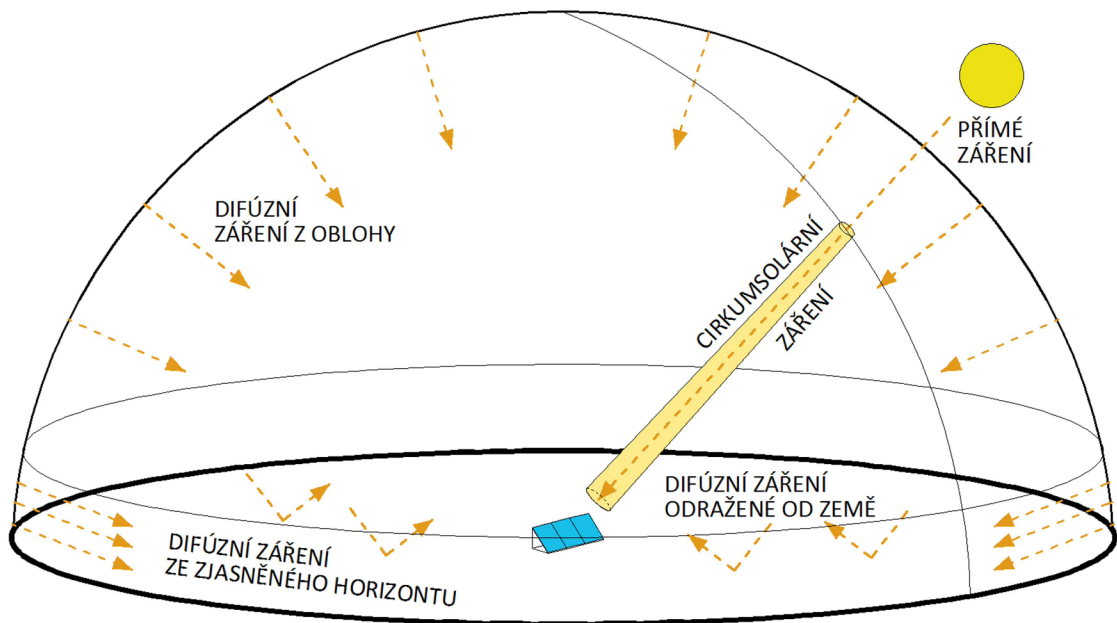
Obr. 5 - Aktinometr (Kipp & Zonen, 2018)



Obr. 6 - Segmentový pyranometr (foto autora)

### B.2.3 Difúzní záření

Difúzní záření se skládá celkem ze 3 složek (Duffie, 2013), jak je patrné na Obr. 7:



Obr. 7 - Grafické znázornění složek globálního slunečního záření

$$I_d = I_{d,izo} + I_{d,cs} + I_{d,hz} \quad \text{R.8}$$

Kde	$I_{d,izo}$	Izotropická složka – rovnoměrné difúzní záření z oblohy (jedná se o převládající složku difúzního záření)
	$I_{d,cs}$	Cirkumsolární záření – vzniká rozptylem záření při průchodu atmosférou z kruhové plochy kolem slunce (anizotropní)
	$I_{d,hz}$	Difúzní záření ze zjasněného horizontu – vzniká nízko nad obzorem, kdy záření proniká větší optickou tloušťkou atmosféry a dochází k většímu rozptylu záření. Je nejvýraznější při jasné obloze.

První pyranometr sestavili Abbot a Aldrich v roce 1916. Dříve se používala řada typů pyranometrů založených na principu rtuťových teploměrů (Kalitinův pyranometr) či v Evropě využívaný Robitzschův pyranograf, který funguje na základě nerovnoměrného ohřevu černých a bílých bimetalových proužků (Lahoda, 2015). Pyranometry měří hemisférické sluneční záření, tedy záření přicházející z polokoule nad vodorovnou rovinou. V dnešní době se používají především 2 typy pyranometrů s termočlávkovými čidly, vykazující 100 % citlivost v celém rozsahu slunečního záření 0,30 až 2,00  $\mu\text{m}$  (Kipp & Zonen, 2018):

**Segmentový pyranometr** (Obr. 6) má čidlo složené z řady tenkých měděných segmentů, u kterých se střídá bílá vysoce odrazivá povrchová úprava a černá povrchová úprava s vysokou pohltivostí. Každé čidlo obsahuje řadu termočlávků. Při vystavení článku slunečnímu ozáření dochází k teplotnímu rozdílu mezi bílými resp. černými segmenty a teplotní rozdíl je přímo úměrný slunečnímu ozáření. Pomocí krytu se čidlo chrání před účinky venkovního prostředí a dlouhovlnného záření (nad 3,0  $\mu\text{m}$ ). Tento druh pyranometru se využívá hlavně v Severní Americe.

**Terčíkový pyranometr** pracuje na obdobném principu s pomocí vícenásobného termočlávků. Rozdíl teploty se měří mezi černým povrchem čidla a stíněným tělem pyranometru. Tento druh pyranometru se využívá hlavně v Evropě (Matuška, 2013).

Na obrázcích v Příloze L.2 jsou ukázány pyranometry s manuálním a automatickým stíněním pro měření difúzního slunečního záření. Existují zjednodušené postupy, jak ze solární konstanty pomocí polohy slunce, albeda a zakalení oblohy stanovit hodnoty přímého a difúzního záření. Jedná se ale pouze o orientační hodnoty (Cihelka, 1994).

#### B.2.4 Modely výpočtu difúzní složky globálního záření

Přestože se zvyšuje počet míst měření přímé a difúzní složky slunečního záření, je to z technického hlediska stále ještě komplikované a je potřeba mít nákladné a složité měřicí zařízení. Z těchto důvodů zůstává nejjednodušším způsobem, jak si zajistit výše uvedené složky záření, provést měření globálního slunečního záření a poté pomocí matematického separačního modelu výpočítat difúzní složku slunečního záření.

Těchto separačních modelů existuje víc než 140, přičemž řada z nich je ale jen variantou původního modelu (Engerer, 2015 a Gueymard, 2016). První studie na toto téma byla vytvořena již v roce 1960, byly stanoveny korelace mezi parametry  $K_d$  a  $K_t$  (Liu, 1960), na kterých je založena většina modelů:

$$K_d = \frac{I_d}{I} \quad \text{R.9}$$

$$K_t = \frac{I}{I_{ext}} \quad \text{R.10}$$

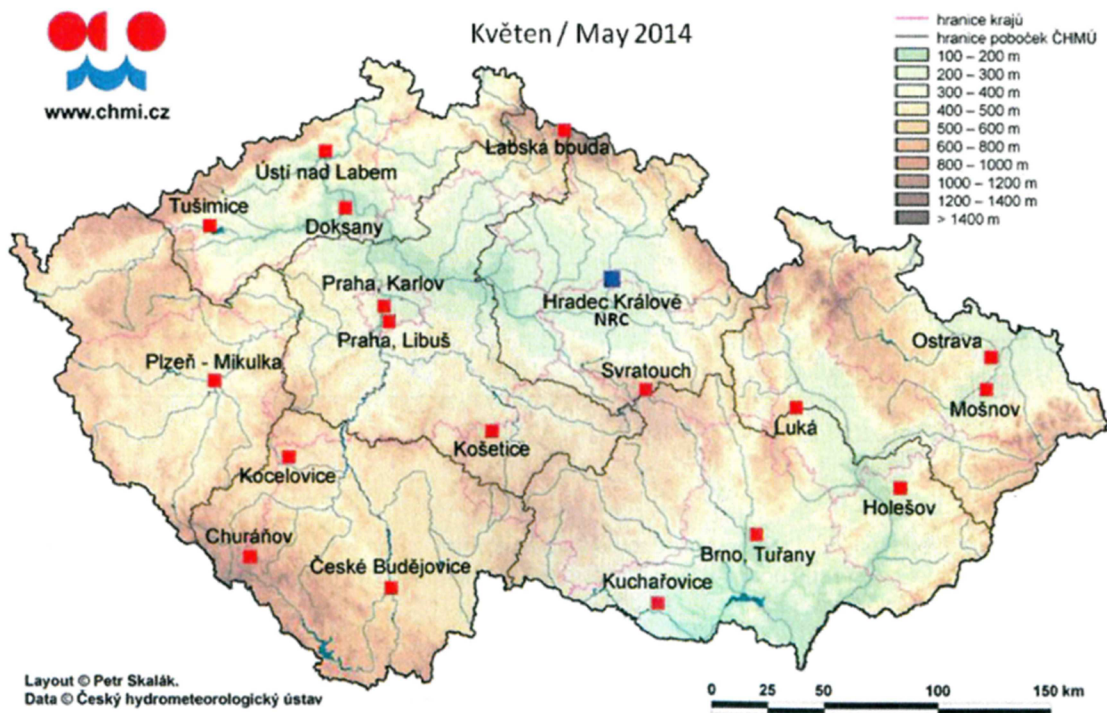
Kde	$K_d$	podíl difúzního ozáření (diffuse fraction), [-]
	$K_t$	Index jasnosti / propustnost atmosféry (clearness index), [-]
	$I$	Globální sluneční ozáření, [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
	$I_d$	Difúzní sluneční ozáření, [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
	$I_{ext}$	Extraterestrální insolace, [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

Jednou z nevýhod mnoha separačních modelů je, že vznikly pro danou lokalitu (země, kraj) a měření byla provedena pouze na několika místech. Hrozí zde proto riziko, že budou použitelné pouze pro místa podobná lokalitám, pro které byly vyvinuty (stejně albedo, prach v ovzduší a další). Jedním z řešení je použití více proměnných do rovnic, aby se více zohlednila posuzovaná lokalita. Modely lze rozdělit na: polynomický, exponencionální a logistický (Lanini, 2010).

### B.2.5 Měření slunečního záření na našem území

Složky slunečního záření se na našem území měří od začátku 50. let 20. století. První měření globálního a přímého záření bylo provedeno na Solární a ozónové observatoři v Hradci Králové v roce 1953. V následujících letech probíhala krátkodobá měření na dalších stanicích v rámci různých výzkumných úkolů. S rostoucí potřebou měření slunečního záření došlo v roce 1984 k zásadnímu rozšíření měřících stanic a prakticky vzniku radiační sítě ČHMÚ (Vaníček, 2015).

Na Obr. 8 a Tab. 27 (příloha L.3) je uveden seznam stanic, které jsou součástí radiační sítě ČHMÚ se základními měřenými parametry slunečního záření. Celkově je již k roku 2014 v síti 19 stanic umístěných v typických geografických a klimatických oblastech území ČR.



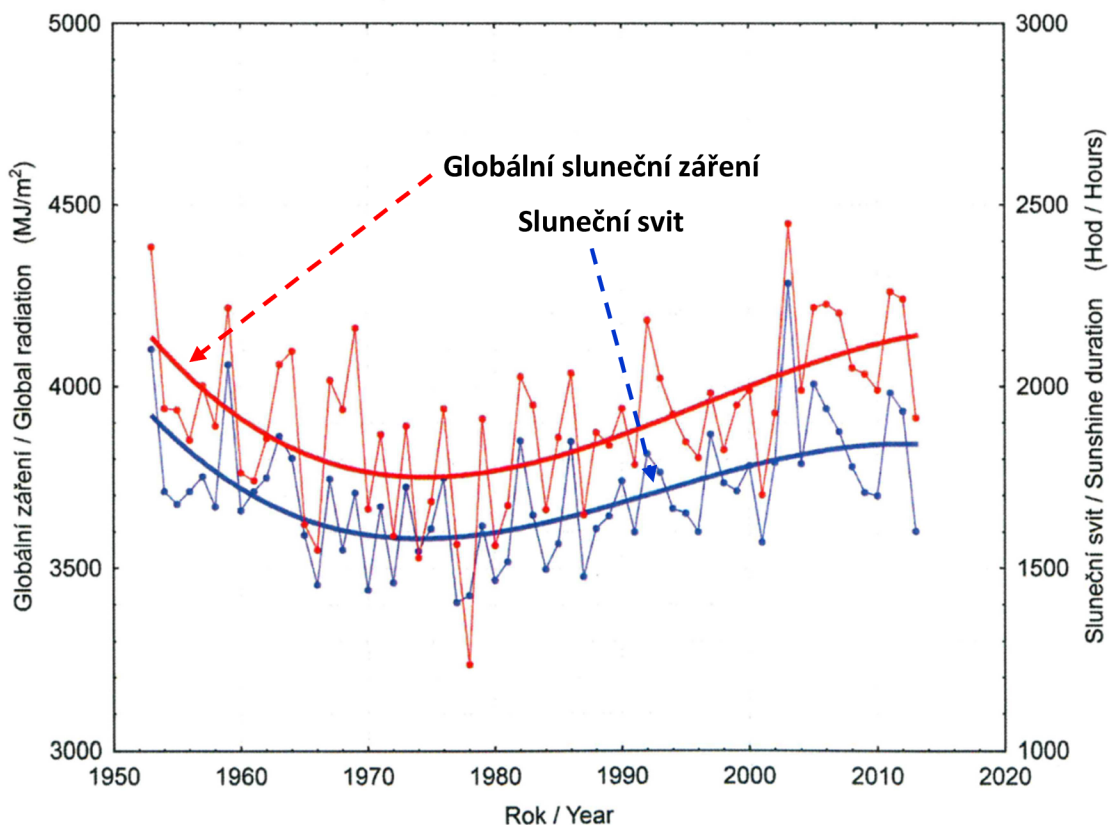
Obr. 8 - Stanice radiační sítě ČHMÚ (Vaníček, 2015)

Tato síť je řízena ze stanice Hradec Králové, která plní úlohu Národního radiačního centra ČR (NRC). Stanice provádí kalibraci radiometrů vůči Národnímu radiačnímu standardu ČR – absolutní dutinový pyrhelimetr AHF, č. 30497. Naměřené údaje jsou vztaženy k pyrhelimetrické stupnici WRR (od roku 1980), která zaručuje jejich mezinárodní porovnatelnost. Národní radiační

standard je navázán na světový standard udržovaný ve světovém radičním centru SMO v Davosu (Schovanková, 2010 a Vaníček 2015).

### B.2.6 Dlouhodobé změny globálního záření na našem území

Dlouhodobé změny globálního záření mají vliv na kolísání klimatu v dané oblasti. Na Obr. 9 jsou znázorněny roční úhrny globálního ozáření a slunečního svitu naměřené v SOO Hradec Králové v období 1953 až 2013. Z průběhu polynomické spojnice trendu je patrné, i přes značné meziroční kolísání, že v průběhu posledních 60 let došlo ke značné změně v množství slunečního ozáření zemského povrchu (Tolasz, 2007 a Vaníček 2015).



Obr. 9 - Vývoj globálního ozáření měřeného v SOO Hradec Králové (Vaníček, 2015)

Úbytek globálního slunečního záření po 2. světové válce byl přisuzován rostoucím koncentracím antropogenního aerosolu (pevné a plynné částice) v důsledku průmyslového a sociálního rozvoje. Tomuto období se zavedlo označení „global dimming“ (globální stmívání). V průběhu 80. let minulého století se ale úhrny globálního slunečního ozáření začaly zvyšovat (global brightening - globální vyjasňování), přestože se koncentrace antropogenního

aerosolu stále zvyšovaly. V průběhu 70. a 80. let minulého století byly pravděpodobně hlavní příčinou změny cirkulace atmosféry a tím i výskytu oblačnosti, která je ale také ovlivňována právě antropogením aerosolem. Časový průběh stmívání - vyjasňování má zatím zjevně globální charakter, ale jejich intenzita je regionálně odlišná. Zatímco rozjasnění do určité míry přetrvává v Evropě a Spojených státech, existují náznaky obnoveného stmívání v Číně a v jiných asijských zemích spojeného s obrovským nárůstem emisí po roce 2000 vlivem rozvoje průmyslu. Objasnění příčin vzniku stmívání - vyjasňování však nelze považovat za zcela uzavřené (Wild, 2012).

## **B.3 Solární termické systémy**

### **B.3.1 Vývoj solárních termických systémů**

Již v roce 1767 švýcarský vědec Horace-Bénédict de Saussure sestavil první prototyp termického kolektoru, který se používal pro ohřev jídla. Jednalo se o dřevěnou krabici s vnitřní izolací a skleněným vrchním krytem, kde teplota uvnitř dosahovala až 109 °C (The History of Solar, 2017). V 19. století řada objevitelů experimentovala se solárním motorem s využitím parabolických koncentračních zrcadel. Řešila se také otázka bezpečného způsobu ohřevu teplé vody. Postupem času se začaly objevovat vodní nádrže natřené černou barvou, aby absorbovaly co nejvíce sluneční energie. Nevýhodou tohoto řešení byla dlouhá doba ohřevu a v nočním období velké tepelné ztráty z důvodu chybějící tepelné izolace.

Roku 1891 Clarence Kemp z Baltimoru patentoval první komerční solární ohříváč vody (Climax Solar-Water Heater). Jednalo se o vodní zásobník natřený na černo, umístěný v boxu a krytý skleněnou deskou. V následujících letech se tento a na něm založené systémy postupně vyvíjely. V roce 1909 William J. Bailey patentoval solární termický systém s odděleným izolovaným zásobníkem teplé vody a absorbéru, který se skládal z kovových trubek spojených plechem natřeným černou barvou. Absorbér byl ukryt ve skleněném boxu. Tyto jednoduché systémy ohřevu teplé vody byly ale v následujících letech vytlačeny z trhu konkurencí fosilních paliv (Solar Thermal History, 2017).

S dopady 1. a 2. ropné cenové krize na ekonomiku se opět objevily snahy nalézt alternativní zdroje energie k fosilním palivům. Probíhal technologický

rozvoj OZE a hlavně díky kosmickým programům se rychle rozvíjela fotovoltaika. Po snížení cen fosilních paliv mnohé vlády začaly podporovat rozvoj OZE, aby se do budoucna zamezilo ekonomickým problémům z dob ropných krizí. Dalšími důvody podpory a rozvoje OZE jsou také snahy o ochranu životního prostředí, boj se skleníkovými plyny a snaha o zajištění diverzifikace zdrojů energie (Ramlow, 2010). V 80. letech 20. století probíhal na našem území vývoj hlavně pro zemědělské účely, byl ale postupně utlumen z důvodu nízkých cen klasických paliv a dlouhé návratnosti solárních systémů (Solární kolektory pro ohřev vody v bývalém Československu 1977-1992, 2006)

Se zvyšujícími se požadavky na úsporu energie, kvalitní architekturu dnešní výstavby a s využitím už odzkoušených a vyspělých technologií solárních termických systémů je dalším krokem provést integraci těchto systémů do obálky budovy, která se tak stává zdrojem energie. Toto řešení nám zajistí nejen větší využitelnou plochu těchto systémů, ale kromě toho nám tyto systémy mohou nahradit a převzít funkci dalších částí obálky budovy (ekonomické hledisko). Jedná se o povrchové úpravy obvodových stěn, náhrada střešního pláště šikmých střech apod. Je potřeba zohlednit ale celou řadu požadavků (Wall, 2012):

- přirozená integrace - solární termické prvky mohou být skryté, ale mohou také plnit dominantní vizuální architektonickou funkci;
- nové tvarové řešení systémů (design) z důvodu zakomponování do architektury budovy;
- materiálová a barevná variabilita systémů.

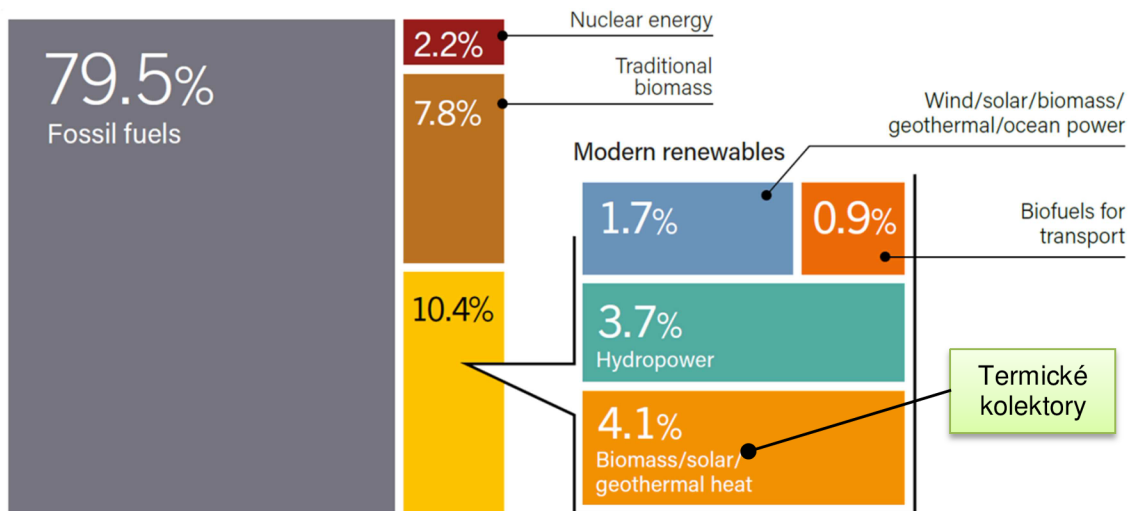
Výhodou solárních termických a fotovoltaických systémů je jejich možnost prefabrikace v rámci obvodového pláště budovy a tím urychlení výstavby, především u energetických rekonstrukcí. Nevýhodou je složitější návrh systému, kdy se musí zohlednit např. stínění okolními překážkami (budovy, zeleň apod.) a kombinace systému na střeše resp. obvodové stěně z hlediska klimatických dat. Z těchto důvodů je návrh složitější a použitím simulačních softwarů jsme schopni nalézt neoptimálnější řešení pro danou stavbu.



### B.3.2 Stav solárních termických systémů ve světě

S rozvojem technologií obnovitelných zdrojů energie se snižují náklady na jejich pořízení a zároveň se zvyšují investice do nich vložené. Velký rozvoj je patrný v energetickém odvětví vlivem větší poptávky po energii a snahou o decentralizaci zdrojů energie.

Na Obr. 10 je uveden odhadovaný podíl solárních termických systémů na dodávkách celkové energie. Výraznější rozvoj probíhá v dálkovém vytápění, pro které se stavějí nové solární parky, a v průmyslu.



Obr. 10 - Odhadovaný podíl obnovitelných zdrojů na celkové spotřebě energie v roce 2016 (Renewables, 2018)

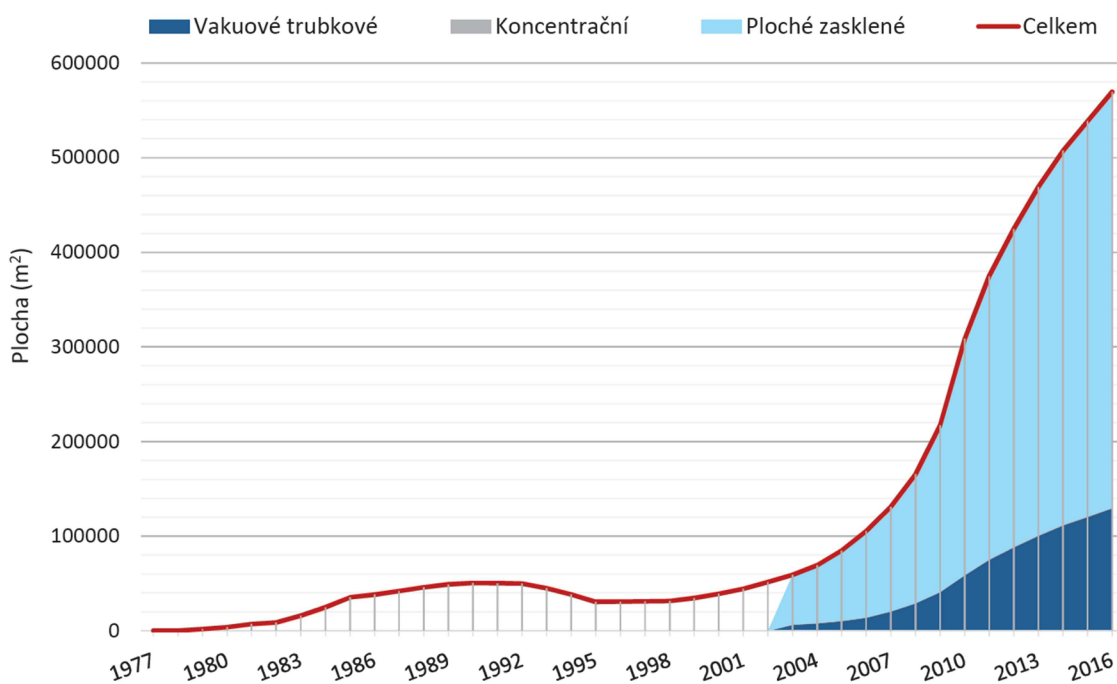
Celkový instalovaný výkon ve světě je odhadován na 472 GW. V roce 2018 je nárůst cca 4 % oproti roku 2016, především v Číně, Turecku a Indii. Odhad vyrobené energie zasklených a nezasklených solárních termických kolektorů je  $3,9 \cdot 10^8$  MWh. Energie je využita nejen pro ohřev teplé vody, vytápění, ale také pro chlazení, odsolování vody, sušení a další.

I když stále dochází k meziročnímu přírůstku celosvětového výkonu, vlivem rozvoje technologie ostatních obnovitelných zdrojů energie se meziroční přírůstek poslední 4 roky snižuje. V nových instalacích je použito 73 % vakuových kolektorů, 23 % zasklených a 4 % nezasklených plochých kolektorů (Renewables, 2018).

### B.3.3 Stav solárních termických systémů v ČR

Převážná většina instalací solárních termických systémů v ČR je v rodinných domech. Jedná se o malé instalace určené zpravidla pouze pro 1 rodinu. Větší instalace pro bytové domy a ostatní budovy jsou velmi málo rozšířené.

Na Obr. 11 je vidět odhad vývoje instalované plochy činných solárních termických kolektorů. Největší skok proběhl v letech 2009 až 2011. Odhad využitelné tepelné energie pro rok 2016 je 218,6 MWh.



Obr. 11 - Vývoj plochy činných solárních termických kolektorů (Obnovitelné zdroje energie v roce 2016, 2017)

### B.3.4 Konstrukční řešení malých solárních termických systémů

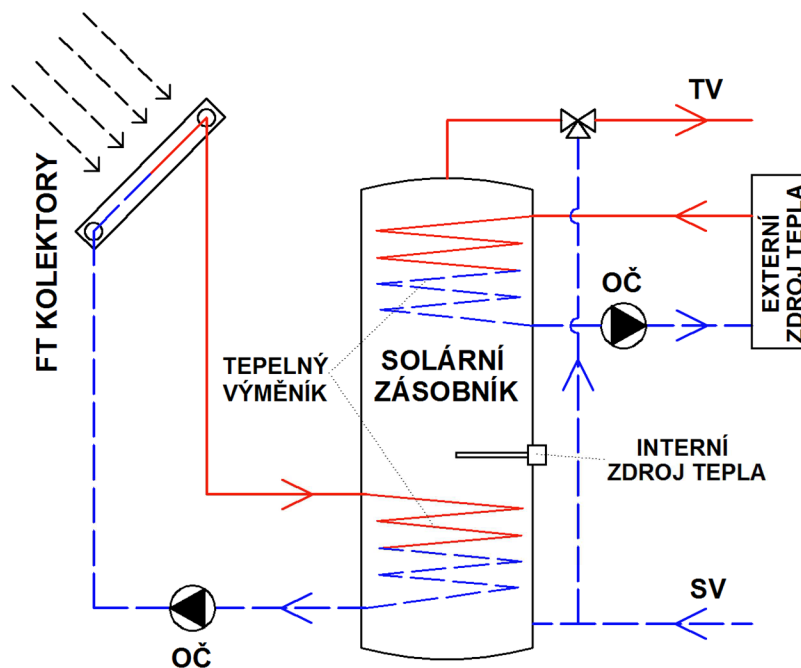
Solární systémy mají mnohá využití, podrobněji se komplexnímu využití této technologie věnuje publikace (Thirugnanasambandam, 2010). Na našem území se tato technologie používá především pro 3 základní úkoly:

- ohřev bazénové vody;
- ohřev teplé vody (nejvíce rozšířená technologie u nás);
- ohřev teplé vody a vytápění.

Solární termické systémy se dají dělit podle celé řady hledisek, u kterých záleží, na co se používají a čeho se chce dosáhnout.

U nás nejčastěji používaný malý solární termický systém s nuceným oběhem určený k ohřevu teplé vody se dá z konstrukčního hlediska rozdělit na primární okruh - termické kolektory, rozvody primární vody (nejčastěji teplosměnná kapalina s použitím i v zimním období), trubkový tepelný výměník na rozvodu primární vody a solární zásobník. A na sekundární okruh - zdroj pitné vody, zdroje tepla určené pro dohřev teplé vody a rozvody teplé vody (Laughton, 2010).

Na Obr. 12 je znázorněno obecné schéma malého solárního systému pro ohřev teplé vody s nepřímým nabíjením a přímým vybíjením solárního zásobníku s nuceným oběhem.



Obr. 12 - Obecné schéma solárního termického systému s bivalentním solárním zásobníkem

### B.3.5 Způsob provozu solární termické soustavy

Jedním z nejdůležitějších úkonů při návrhu solárního termického systému je stanovení objemového průtoku teplosměnné kapaliny v primárním okruhu. Průtok má vliv na návrh celé soustavy (velikost solárního zásobníku, velikost solárního pokrytí, velikost kolektorového pole apod.). Rozlišuje se několik konceptů (Ladener, 2003).

**High-flow** (vysoký průtok) - jedná se o nejběžnější koncept, který se využívá u malých solárních soustav s krátkodobou akumulací. Průtok

je v rozmezí 40 až 70 l·m<sup>-2</sup> kolektorového pole. Teplosměnná kapalina se ohřívá v kolektoru o méně než 15 °C a díky malému teplotnímu rozdílu pracuje kolektor s dobrou účinností. Malý teplotní rozdíl v primárním okruhu ale znamená pomalý způsob ohřevu solárního zásobníku na požadovanou teplotu.

**Low-Flow** (nízký průtok) - jedná se o soustavy, které pracují s výrazně menším průtokem, který je v rozmezí 8 až 15 l·m<sup>-2</sup> kolektorového pole. Menší průtok je zajištěn nízkým výkonem oběhového čerpadla primárního okruhu a způsobuje vyšší ohřátí teplosměnné kapaliny až o 50 °C v kolektorech. Díky vyšší teplotě jsme schopni rychleji vyhřát solární zásobník na požadovanou úroveň bez výraznějšího externího dohřevu. Menší objemový průtok také znamená zmenšení dimenzí rozvodů, tedy menší tlakové ztráty a úspory na materiálu.

Jedná se o relativně novou technologii, kterou je nutné ještě ověřit v praxi. Její význam roste s použitím u větších instalací, se sériovým zapojením kolektorových polí, kde se s výhodou pro vyšší teploty teplosměnné kapaliny využívají stratifikační zásobníky.

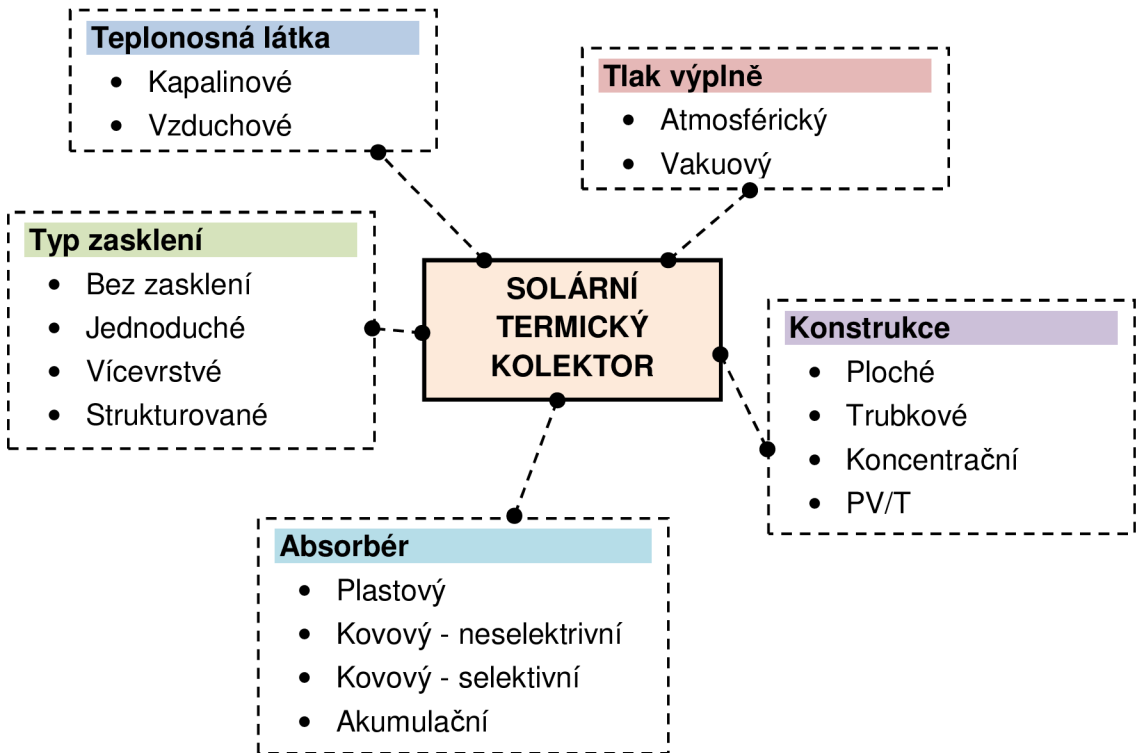
**Matched-Flow** (přizpůsobivý průtok) - jedná se o systém, který kombinuje výhody 2 předešlých konceptů. Průtok je v rozmezí 8 až 40 l·m<sup>-2</sup> kolektorového pole. Nevýhodou je náročný systém regulační techniky, a zatím malé zkušenosti uživatelů s tímto systémem.

**Drain-Back** je solární systém, který využívá možnost částečného odvodnění primárního okruhu (kolektory a potrubí v exteriéru) do záchytné nádrže v době vypnutí solárního systému či výpadku elektřiny. Při zapnutí systému oběhové čerpadlo opět naplní primární okruh s určitým množstvím vzduchu. Výhodou je zamezení rizika varu teplosměnné kapaliny (odpadá nutnost expanzní nádoby) a nemusí se používat nemrznoucí směsi v primárním okruhu. Nevýhodou je riziko koroze z důvodu výskytu vzduchu v solárním systému.

### B.3.6 Solární termické kolektory

Jedná se o speciální druh výměníku tepla, který přeměňuje sluneční záření na teplo, které se v kolektoru předává teplosměnné látce. Oproti klasickým výměníkům je rozhodující přenos tepla zářením ze vzdáleného sálavého zdroje.

Na Obr. 13 je uvedeno základní členění solárních termických kolektorů z různých hledisek.



Obr. 13 - Základní členění solárních termických kolektorů (Matuška, 2013)

Matematický model chování solárního kolektoru je podrobně popisován v řadě publikací (Duffie, 2013; Ledener, 2003 a další), které staví na práci řady svých předchůdců.

Jádro kolektoru tvoří absorbér, který je opatřen zpravidla keramicko-kovovou selektivní vrstvou, která má ve vlnových délkách slunečního záření vysokou pohltivost a v oblasti infračerveného dlouhovlnného záření (nad 3,0  $\mu\text{m}$ ) vykazuje nízkou emisivitu (omezení tepelných ztrát sáláním). Součástí absorbéru je různě hydraulicky řešený registr, kterým proudí teplosměnná látka odvádějící teplo. Pro omezení tepelných ztrát se boky a dno vany kolektoru opatřují tepelnou izolací. Samotný kolektor je krytý zasklením (krytem), které

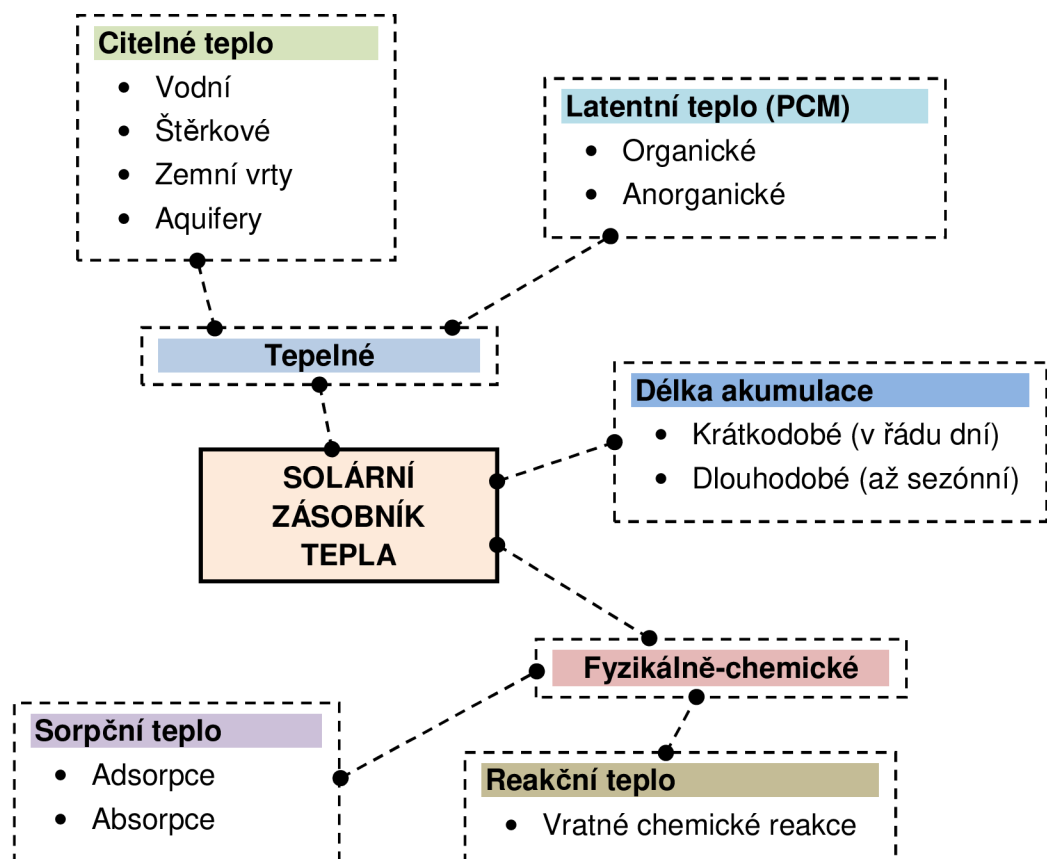
obsahuje co nejmenší množství oxidu železa z důvodu omezení optických ztrát způsobených pohlcením slunečního záření.

Pokud budeme účinnost solárního termického kolektoru posuzovat pouze na základě vlivů působících na kolektor, bez zohlednění samotného materiálu a konstrukce absorberu apod, tak největší vliv má optická účinnost zasklení a tepelné ztráty, které rostou se zvyšující se teplotou absorberu (Matuška, 2013).

### B.3.7 Solární zásobníky

Kvůli nepravidelným dodávkám a odběrům tepla je nutné solární termický systém doplnit o zásobník tepla. Z fyzikálního hlediska nás u zásobníků zajímá hustota a účinnost akumulace tepla. Nejnížší hustotu mají zásobníky s využitím citelného tepla 100 až 300 MJ·m<sup>-3</sup> a nejvyšší hustotu zásobníky využívající vratných chemických reakcí až 3 000 MJ·m<sup>-3</sup> (Matuška, 2013).

Na Obr. 14 je provedeno rozdělení solárních zásobníků dle způsobu akumulace tepla.



Obr. 14 - Základní rozdělení zásobníku tepla podle principu akumulace tepla (Matuška, 2013)

Pro malé solární systémy, které využívají krátkodobou akumulaci, je z praktických důvodů nejvýhodnější akumulace s využitím citelného tepla. Nejčasteji používanou pracovní látkou je voda, která je ekonomicky výhodná, dostupná a má vysokou tepelnou kapacitu. Nevýhodou je omezené rozmezí pracovních teplot a riziko koroze.

Pro komfort uživatele a správný provoz solárního termického systému je potřeba, aby docházelo k rozvrstvení objemu zásobníku podle teploty. V horní části zásobníku je dostatečně vysoká teplota, kterou uživatel požaduje, a v dolní části zásobníku je zároveň dostatečně nízká teplota, aby teplosměnná látka primárního okruhu dodávala teplo do zásobníku i při malé intenzitě slunečního záření. Vliv na teplotní rozvrstvení (v tomto případě promísení) má především způsob přívodu a odvodu pracovního média zásobníku, způsob předávání tepla kolektorovým okruhem a tepelné ztráty zásobníku. Pro udržení teplotního rozvrstvení zásobníku vlivem vztakových sil se z konstrukčního hlediska používají převážně štíhlé zásobníky, kde poměr mezi výškou a průměrem je větší než 2. Problém teplotního rozvrstvení u malých solárních soustav úzce souvisí s velikostí solárních zásobníků. Čím je zásobník menší, tím je složitější omezit promíchávání objemu zásobníku.

Hlavně pro větší solární termické systémy, které mohou mít až sezónní akumulaci, se v poslední době začaly používat stratifikační zásobníky různého konstrukčního řešení. Stratifikace je řízené rozvrstvení teploty v zásobníku. Jsou opatřeny zpravidla trubkovou stratifikační vestavbou, tzv. pasivní stratifikací se zpětnými klapkami, které pracují na základě rozdílu hustot mezi přiváděnou resp. odváděnou vodou a vrstvami v zásobníku. Tzv. aktivní způsob stratifikace je řešen napojením zásobníku na řadu výškově řazených ventilů, osazených čidly a regulací, které řízeně porovnávají teploty v jednotlivých vrstvách. Použití stratifikačních zásobníků je výhodné u soustav s malým průtokem low-flow z důvodu omezení promíchání a vysokých pracovních teplot. Stupeň stratifikace je závislý především na konstrukčním řešení zásobníků a podmínkách provozu (Han, 2009).

## **B.4 Návrh solárního termického systému**

### **B.4.1 Dle zkušeností**

Při návrhu malého solárního termického systému s krátkodobou akumulací se z důvodu ušetření ekonomických prostředků investora mnohdy navrhuje systém dle zkušeností montážní/projekční společnosti bez podrobnější projektové dokumentace či provedení výpočtů pro ověření funkčnosti systému.

Zásadní je stanovení objemu solárního zásobníku, který závisí na řadě parametrů, především na požadované funkci systému, navrhovaném solárním pokrytí, velikosti kolektorového pole a předpokládaného odběru TV. Pro krátkodobou akumulaci (v řádu několika dnů) se nejčastěji navrhuje objem solárního zásobníku o velikosti 50 až 70 litrů na 1 m<sup>2</sup> plochy apertury kolektorového pole, který nám zajistí optimální variantu mezi dostatečným solárním pokrytím a vynaloženými finančními prostředky (Matuška, 2012). Při malém odběru teplé vody ale hrozí, že akumulační schopnost zásobníku bude malá a nevyužije se tedy potenciál solární termické soustavy. Velikost solárního zásobníku se pro běžný provoz navrhuje na 1,5 až 2 násobek denní spotřeby TV (Ladener, 2003).

Obecný návrh solárního termického systému neřeší pouze velikost zásobníku TV a kolektorového pole, ale týká se řady dalších případných prvků navrhovaného systému:

- důkladné provedení zateplení zásobníku TV včetně všech armatur (potrubí, čidla apod.);
- minimalizování délek rozvodů a cirkulace TV, abychom omezili tepelné ztráty a zjednodušili hydraulické vyrovnání soustavy;
- omezení běhu oběhového čerpadla cirkulace na nezbytné minimum;
- pro další úspory je vhodné použít úsporné výtokové baterie či perlátory z důvodu zmenšení samotné spotřeby TV.

### **B.4.2 Zjednodušené výpočetní postupy**

Pro běžnou stavební praxi je použití simulačních nástrojů komplikované, z časové a finanční náročnosti a obtížně dostupných vstupních parametrů.



Proto se často uchylujeme k použití zjednodušených výpočetních postupů. Zjednodušeným výpočtem lze těžko plně postihnout realitu provozu solárního termického systému, nicméně výpočet alespoň ukáže, zda vlastní návrh od počátku dává smysl při nízkém počtu vstupních údajů. Nástroje jsou zpravidla vybaveny jednoduchými solárními soustavami, které nám nedovolují jejich modifikaci. Je možné volit velikost, pozici kolektorového pole a objem solárního zásobníku. Údaje o klimatických datech jsou omezeny zpravidla na trvale definované polohy různého počtu.

### **Zjednodušená měsíční bilanční metoda dle TNI 73 0302**

Metodika dle TNI 73 0302 stanovuje roční tepelné zisky solární termické soustavy na základě porovnání teoreticky využitelných tepelných zisků termických kolektorů a potřeby tepla, která má být kryta v jednotlivých měsících. V TNI jsou uvedeny jednotné klimatické údaje, které se používají pro celou ČR (odpovídají Praze). Výpočtový postup je určen pro 3 základní typy solárních soustav (ÚNMZ, 2014) - příprava TV; kombinovaná příprava TV a vytápění; ohřev bazénové vody.

V roce 2014 došlo k úpravě metodiky na základě porovnávání se simulacemi v software TRNSYS. Upravovaly se parametry tepelných ztrát soustavy, střední teplota kolektoru a klimatické údaje. Snahou bylo zvýšit věrohodnost výsledků výpočtů (Matuška, 2014).

### **Metoda F-Chart**

Metoda F-Chart, vyvinutá v 70. letech 20. století v USA, poskytuje odhad měsíčního solárního pokrytí potřeby tepla v dané soustavě na základě vstupních parametrů (plocha kolektorů, objem solárního zásobníku apod.). Metoda byla odvozena ze stovek simulačních výpočtů tepelného chování solárních soustav v softwaru TRNSYS. Solární pokrytí se stanovuje pomocí funkce korelace 2 bezrozměrných parametrů X (ztrátový) a Y (ziskový) (Duffie, 2013).

Metoda F-Chart byla zavedena v evropské normě ČSN EN 15316-4-3 pro stanovení produkce tepla solárními soustavami. Metoda ovšem byla modifikována (Matuška, 2013).

Tab. 1 - Seznam vybraných zjednodušených výpočetních nástrojů

#	Nástroj	Země původu	Klimatická data	Variabilita návrhu solárního systém	WWW zdroj
1	BilanceSS	ČR	TNI 73 0302, 2014	Plocha kolektorů	(BilanceSS, 2018)
2	SOLAR - Reflex	ČR	ČR - 77 míst	Plocha kolektorů a objem zásobníku	(Solar, 2018)
3	Oventrop	Německo	Svět – 1 100 míst (21x ČR)	Plocha kolektorů a objem zásobníku	(Oventrop, 2018) (vývoj - Valentin Software, 2018)
4	Viessman ESOP Online	Německo	Evropa - 71 míst (bez ČR)	Plocha kolektorů a objem zásobníku	(Viessman ESOP Online, 2018), (vývoj - Valentin Software), 2018
5	T*SOL Online Calculation	Německo	Svět - 192 míst (2x ČR)	Plocha kolektorů a objem zásobníku	(T*SOL Online Calculation, 2018)
6	Junkers Solarsimulation	Německo	ČR - 33 míst	Více parametrů	(Junkers Solarsimulation, 2018)
7	Polysun Online	Switzerland	Svět - více než 8300 míst	Více parametrů	(Polysun online, 2018)
8	F-Chart	USA	Svět - přes 300 míst (možné přidat vlastní)	Více parametrů	(F-Chart Software, 2018)
9	TECSOL - Thermique	Francie	více než 400 míst (bez	Více parametrů	(TECSOL – Thermique, 2018)
10	Kalkener	Španělsko	Nutné dodat	Více parametrů	(Kalkener, 2018)

### **B.4.3 Numerické simulace**

Pro detailnější práci se solárními termickými systémy nám slouží numerické simulace, které nahradily finančně a časově náročné experimentální měření. Vývoj simulací lze zhrnout do 3 fází: numerické techniky, analogové počítače a digitální počítače s uživatelsky příjemným prostředím (Shrivastava, 2017). Simulace pracují s předvídatelnými podmínkami jako jsou technické systémy budovy a s obtížně předvídatelnými podmínkami jako jsou klimatické podmínky a provoz systému uživateli. Simulace využívají matematické modely jednotlivých prvků definovaných podrobnými parametry. Matematické modely pocházejí z výsledků laboratorních zkoušek, měření soustav v praxi či ze simulací jiných softwarů (Matuška, 2013).

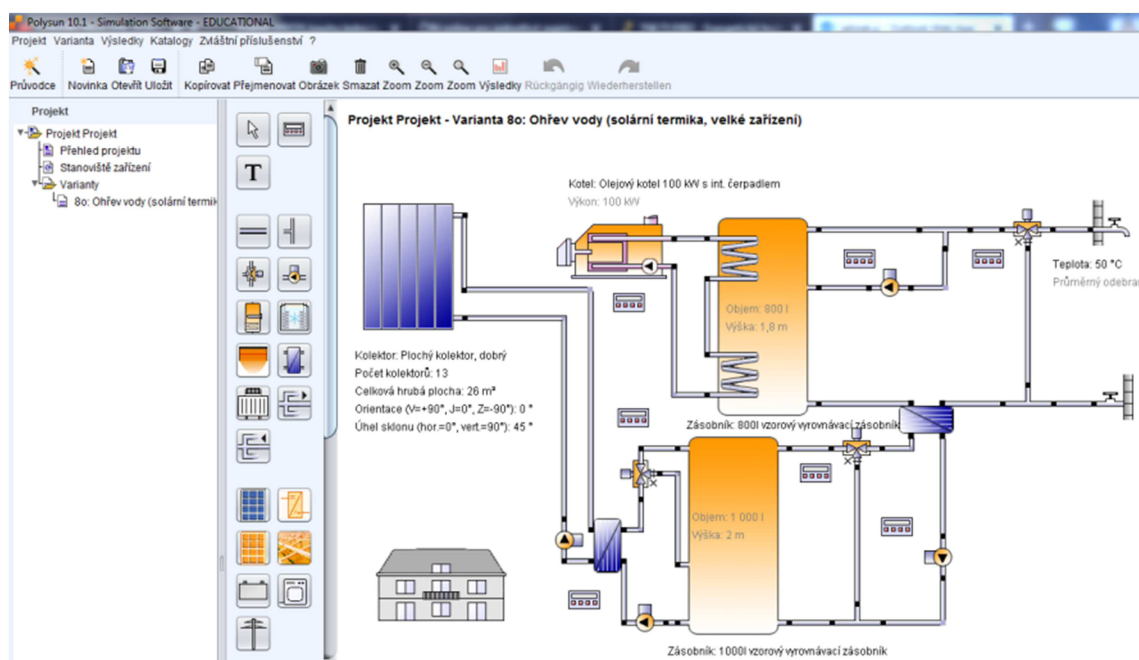
S rozvojem energeticky úsporných (inteligentních) budov se nám zvyšují požadavky na řešení systémů TZB, které jsou navzájem propojené. Simulační nástroje nám umožňují komplexně řešit a optimalizovat návrh systémů TZB a jejich propojení se stavbou (Oliva, 2015).

#### **Polysun**

Software byl komerčně uveden v roce 1994 a řešil solární přípravu TV a vytápění. S postupným rozvojem OZE se přizpůsobil a dnes poskytuje komplexní služby v tomto odvětví. Software obsahuje přehledné grafické prostředí s možností použití průvodce, ve kterém je možné si vybrat jednu z více než 900 předefinovaných šablon zapojení systémů. Nebo je možné sestavit systém z jednotlivých modulů, které jsou definovány modifikovatelnými parametry. Použití modulů nám umožňuje propojovat jednotlivé druhy OZE a řešit tak složité soustavy TZB s omezenou interakcí budovy.

Numerický algoritmus řeší rovnice energetické a hmotnostní bilance pro každou část soustavy. Přenos tepla je řešen pomocí diferenciálních rovnic prvního řádu a transport kapaliny pomocí techniky „plug flow“.

Software obsahuje databázi kolektorů, zásobníků a dalších komponent, které jsou průběžně rozšiřovány a dnes již obsahují tisíce položek. Součástí jádra softwaru je generátor klimatických údajů Meteonorm, který poskytuje údaje z více 8 300 meteorologických stanic po celém světě (Polysun, 2018).



Obr. 15 - Pracovní prostředí v softwaru Polysun EDUCATIONAL, verze 10

## TRNSYS

Software (Transient System Simulation Tool), který je komerčně využíván od roku 1975 a je stále rozvíjen a doplňován o nové komponenty. Byl vyvinut pro studium solárních procesů a jejich aplikace, ale postupem času se rozvinul do komplexního simulačního nástroje pro modelování energetických systémů. Software se skládá ze:

- základní programové jádro - vlastní simulace, sledování a řízení;
- moduly (komponenty) - komponenty systému, stavby nebo okrajové podmínky výpočtu (klimatické databáze, potřeba tepla apod.). Software obsahuje 150 základních modelů, které je možné upravovat nebo vytvářet vlastní.

Jedná se o sekvenční software, kdy jednotlivé moduly zpracovávají data pomocí řady algebraických a diferenciálních rovnic a následně je předávají dalšímu modulu podle nastavení schéma modelu (Klein, 2017).

## Simulační nástroje

V Tab. 2 jsou uvedeny běžně používané softwary pro numerické simulace solárních termických systémů, v publikaci (Shrivastava, 2017) jsou uvedeny další.

Tab. 2 - Seznam vybraných simulačních nástrojů pro solární termické systémy

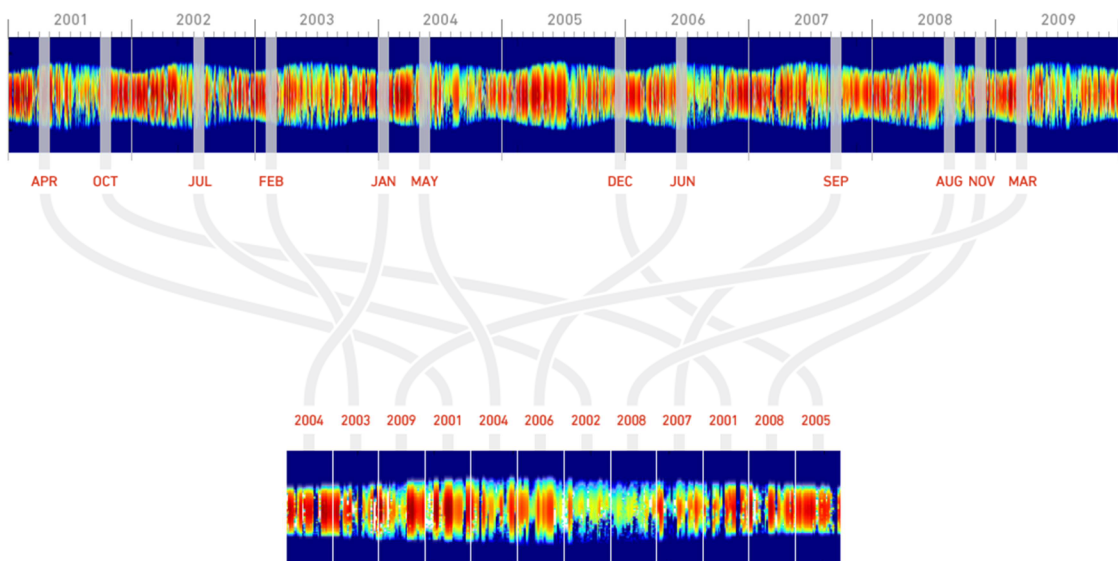
#	Nástroj	Země původu	Varianty softwaru	Klimatické databáze a další zdroje	WWW zdroj
1	Polysun Solar Thermal	Švýcarsko	Professional, Designer, Educational	Meteonorm, import vlastních dat	(Polysun , 2018)
2	T*SOL	Německo	1	Meteosyn, Meteonorm, import vlastních dat	(Valentin Software, 2018)
3	INSEL	Německo	1	Svět - více než 2 000 míst	(INSEL, 2018)
4	GetSolar	Německo	Basic, Professional	EU - více než 250 míst, generátor dat WetSyn	(GetSolar, 2018)
5	TRNSYS	USA	1	TMY pro USA, více než 1000 míst z Meteonormu, <i>import vlastních dat</i>	(TRNSYS, 2018), (Wisconsin University – TRNSYS, 2018)
6	EnergyPlus	USA + svět	1 (free)	Svět - více než 2 000 míst (2x ČR)	(EnergyPlus, 2018)
7	TRANSOL Solar Thermal Energy	Španělsko a Francie	1	Svět - více než 8 000 míst	(TRANSOL, 2018)
8	DesignBuilder ( <i>jádro – EnergyPlus</i> )	Velká Británie	Architects (2), Energy Assessors (3)	Svět - více než 2 000 míst (2x ČR), <i>možné importovat další data z různých databází</i>	(DesignBuilder, 2018)

## B.5 Klimatická data

S dlouhodobě se zvyšujícími požadavky na energetické úspory, vyšší účinnost technických systémů a snížení vlivů stavebnictví na životní prostředí jsou numerické simulace rychlým a efektivním řešením jak budovu posuzovat a optimalizovat v rámci jejího návrhu. Výsledky numerických simulací jsou ovlivněny mnoha nejistotami, které jsou hlavním důvodem rozdílů mezi provozními a simulovanými výsledky. Rozdíly jsou způsobené nesprávným modelováním stavebních konstrukcí, použitých technologií v budově a především vstupních klimatických podmínek, kterým je budova vystavena.

K prvnímu dlouhodobému sledování slunečního záření došlo v padesátých letech v USA. Měření prováděla Národní meteorologická služba pro potřeby zemědělství (Sengupta, 2017). S rostoucí potřebou po dlouhodobých klimatických datech pro numerické simulace se postupně vyvíjely meteorologické roky, které se vytvářejí z historických dat, obvykle v délce 20 až 30 roků. Klimatický rok obsahuje 8760 hodinových dat různých klimatických parametrů (atmosférická teplota a vlhkost, parametry slunečního záření a další). Existují 2 základní principy sestavení meteorologického roku:

- identifikace nepřetržitého 12měsíčního období jako typického roku pro dané období;
- sestavení 12 typických měsíců z dlouhodobého souboru dat.



Obr. 16 - Ukázka výběru typických měsíců pro TMY (Solargis, 2018)

Klimatické roky jsou syntetizovány tak, aby reprezentovaly dlouhodobé statistické trendy a vzory meteorologických dat z dlouholetého měření. Převážně se používá statistika Finkelstein-Schafer, která využívá kumulativní distribuční funkce k výběru typických měsíců z různých let (Finkelstein, 1971). Rozdíly v klimatických rocích jsou zpravidla způsobeny různými váhovými faktory na jednotlivých klimatických parametrech.

Tab. 3 - Postupný vývoj používaných klimatických roků (metodik)

#	Zkr.	Název	Zdroj
1	-	The standard year	(Banseman, 1969)
2	-	The reference year	(Andersen, 1974)
3	TRY	Test reference year	(NCDC, 1976)
4	TMY	Typical meteorological years	(Hall, 1978)
5	WYEC	Weather Year for Energy Calculations	(ASHRAE, 1985)
6	DRY	Design Reference Year	(Lund, 1995)
7	IWEC	The International Weather for Energy Calculations	(ASHRAE, 2001)
8	RKR	Referenční klimatický rok	(ČSN EN ISO 15927-4, 2011)

Klimatické roky jsou postupně aktualizovány pomocí novějších klimatických souborů dat. Zvyšuje se také počet stanic, ze kterých se data používají. Jedná se o TMY2 a TMY3, IWEC2 a WYEC2 apod.

Typické klimatické roky jsou určeny pro hodnocení průměrné energetické náročnosti budovy, produkce energie ze solárních systémů apod. Neposkytují však informace o přirozené proměnlivosti počasí, která je důležitá pro řešení extrémních klimatických podmínek v různých částech světa. Ty je nutné řešit z pohledu např. letního období s extrémními požadavky na spotřebu energie vlivem strojního chlazení. Pro tyto účely jsou určeny netypické klimatické roky. Jako samotné životní prostředí prochází klimatickými změnami, tak i klimatické databáze, které se používají pro energetické simulace, musí projít vývojem, aby dokázaly v budoucnu zohlednit např. účinky městských tepelných ostrovů apod (Herrera, 2017).

Tab. 4 - Přehled specifických klimatických roků

#	Zkr.	Název	Zdroj
1	DSY	The Design Summer Year	(CIBSE, 2002)
2	XMY	The Extreme Meteorological Year	(ferrari, 2008)
3	UMY	The Untypical Meteorological Year	(Narowski, 2013)
4	SRY	The Summer Reference Year	(Jentsch, 2015)
5	HSY	The Hot Summer Year	(Liu, 2016)

### B.5.1 Databáze klimatických dat

Klimatické údaje získáváme z dostupných klimatických databází, které nabízejí data z jednotlivých měřících meteorologických stanic či satelitního snímkování. Získaná data jsou podmíněná tím, co se na jednotlivých stanicích měří a dle časového kroku měření.

Zdroje klimatických dat:

- měření na pozemních stanicích v různém časovém kroku (také radary, meteorologické balóny a další) ;
- numerické modely klimatických parametrů;
- satelitní snímkování.

Z hlediska numerických simulací je problematická dostupnost dat o slunečním záření, které se kvůli velké finanční náročnosti neměří na všech meteorologických stanicích. Chybějící data se nahrazují odhady získanými pomocí řady empirických a dalších metod:

- empirické modely uvedené v kapitole B.3;
- satelitní semi-empirické metody založené na korelaci propustnosti atmosféry a slunečního záření snímaného pomocí satelitů (Cano, 1986);
- fyzikální modely založené na teorii přímého odhadu povrchového záření s vlivem aerosolu, ozónu a dalších vlivů (Sengupta, 2017).



Tab. 5 – Výběr běžně používaných klimatických databází

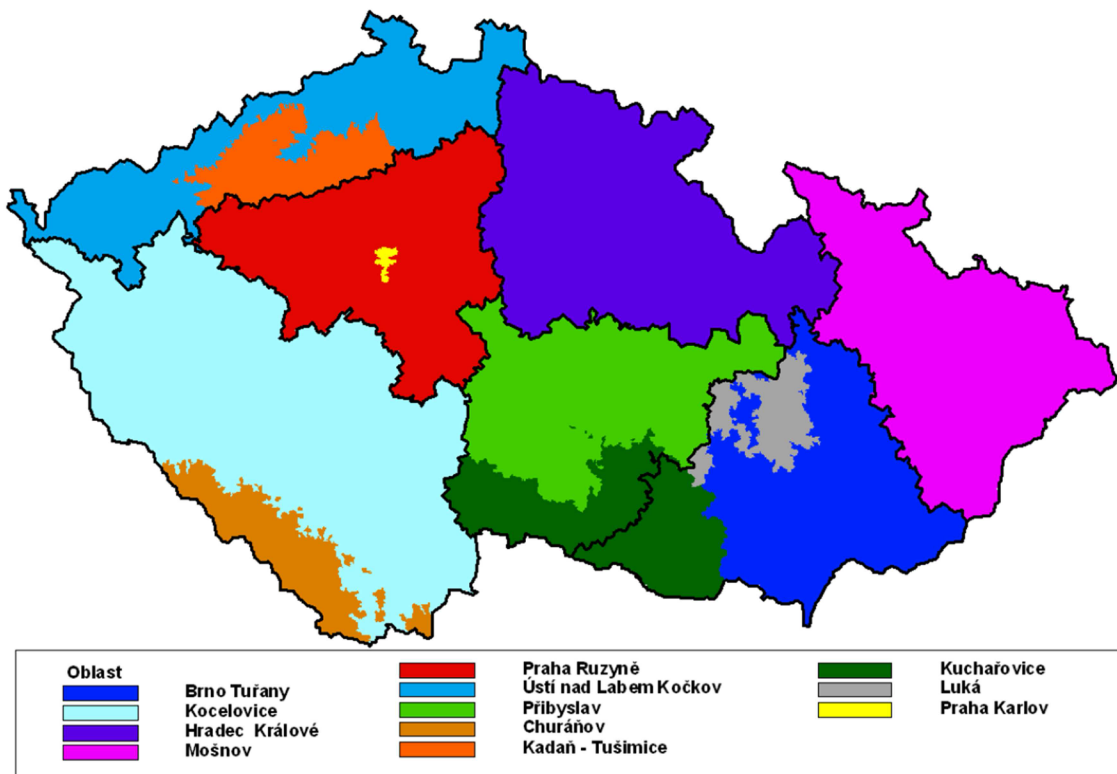
#	Název	Zdroje dat	Komplexní data k dispozici od	Meteorologické parametry	WWW zdroj
1	Weather Bank	-	1994	20 (pouze délka slunečního svitu)	(Weather bank, 2018)
2	Weather source	Svět - více než 10 000 stanic	2000	14 (bez solárních parametrů)	(Weathersource, 2018)
3	Meteonorm 7.2	Svět - 8350 stanic a 5 satelitů	1981	34 (včetně solárních parametrů)	(Meteonorm, 2018)
4	White Box Technologies	Svět - 9100 stanic	2001	Dle stanice	(White Box Technologies, 2018)
5	SOLARGIS	Satelity	1994	10 (včetně solárních parametrů)	(SOLARGIS, 2018)
6	SoDa	Satelity (pozemní stanice pro validaci)	1985	23 + TMY (včetně solárních parametrů)	(SoDa, 2018)
7	NASA POWER	Satelity (pozemní stanice pro validaci)	1981	Velké množství (včetně solární parametrů)	(POWER, 2018)
8	PVGIS 5	Satelity (pozemní stanice pro validaci)	2005 - 2016	Solární parametry + TMY	(PVGIS, 2018)

### B.5.2 Referenční klimatický rok dle ČSN EN ISO 15927-4

Norma ČSN EN ISO 15927-4 (ÚNMZ, 2011) specifikuje statistickou metodu sestavení referenčního klimatického roku (dále jen RKR) z hodinových dat meteorologických parametrů předchozího 15letého období pro posuzování průměrné roční energie na vytápění a chlazení. Data RKR je také možné použít pro dlouhodobé hodnocení a posuzování energetické efektivity aktivních solárních systémů. Metodika není určena k sestavování extrémních klimatických roků, ani k získání spotřeb energie v extrémních obdobích roku. RKR obsahuje celkem 11 meteorologických parametrů včetně globálního, přímého a difúzního slunečního záření (Sedlák, 2010).

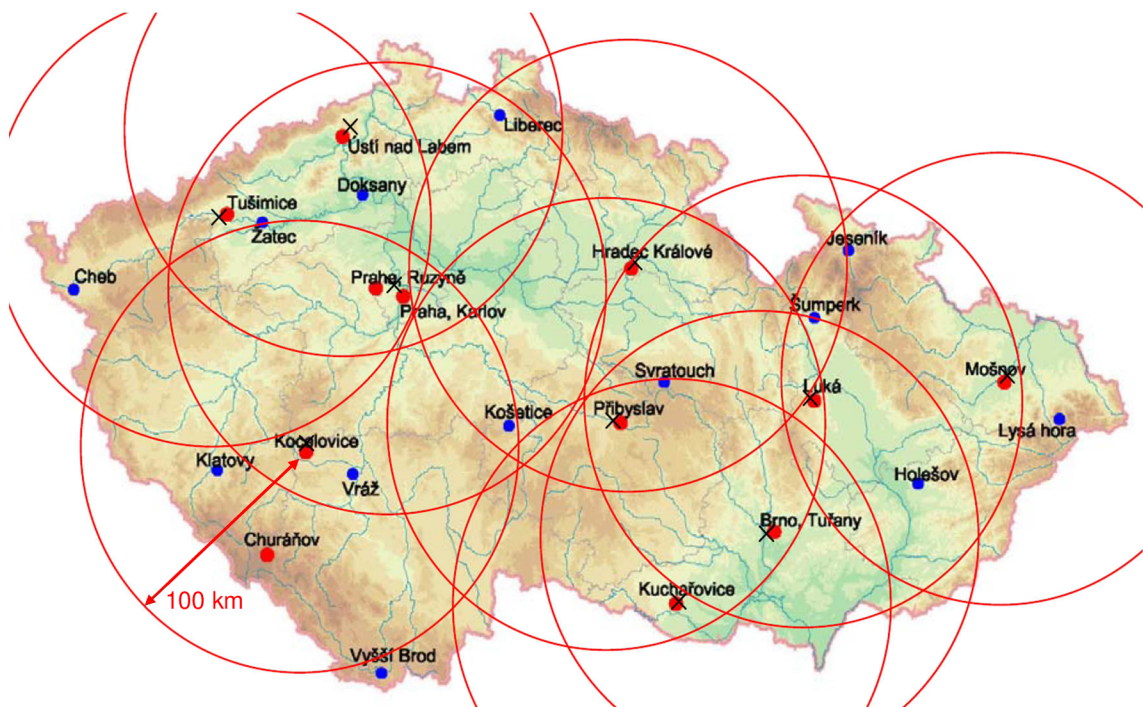
#### Tvorba RKR

Klimatická data RKR jsou vytvořena z naměřených hodinových klimatických dat sedmi páteřních a pěti doplňkových meteorologických stanic (Obr. 17) z referenčního období 1991 - 2005. Stanice byly vybrány na základě jejich geografického rozložení a kvality a existenci naměřených hodinových dat, která prošla formální a věcnou kontrolou v rámci ČHMU.



Obr. 17 - Oblasti působnosti páteřních stanic (ohraničeny černě) a doplňkových stanic (Květoň, 2010)

Z důvodu rozčlenění území ČR na jednotlivé oblasti RKR (rajonizace) bylo nutné provést detailní geografickou analýzu z dostatečného počtu meteorologických stanic. Bylo použito celkem 297 stanic ČHMÚ s měřením z období 1961 až 2000. Dle statistické analýzy byla každá stanice přiřazena do územní příslušnosti k páteřní stanici (Květoň, 2010). Pro některé stanice RKR nebyly k dispozici potřebné parametry slunečního záření. A bylo nutné je doplnit o údaje z podpůrných a referenčních stanic radiační sítě ČHMÚ (Příloha L.4).



Obr. 18 - Rozmístění stanic RKR (páteřní a doplňkové - červené) a podpůrných stanic (modré), (Květoň, 2010)

Při výpočtu parametrů GLB, DIF a DIR se vycházelo z měření SSV referenčních stanic dle studie ČHMÚ (Vaníček, 2010) vycházející ze vztahů doporučených WMO a upravených pro oblast ČR. Při dopočítávání dat GLB se používala 1 referenční stanice a při DIF se používaly 2 referenční stanice (Příloha L.4). Z již kompletních dat se vytvořily staniční RKR pro páteřní a doplňkové stanice.

Tvorba RKR je založena na statistickém výběru „nejlepších“ měsíců pomocí použití Finkelstein-Schaferovy statistiky a dalších statistických kroků a následného sestavení RKR. Základní parametry, podle kterých se vybírají „nejlepší“ měsíce, jsou teplota a vlhkost vzduchu, globální sluneční záření

a jako doplňkový parametr je použita rychlost větru. Chybějící data byla doplněna prostorovou a časovou interpolací s použitím údajů referenčních a podpůrných stanic. K hladkému propojení jednotlivých vybraných měsíců slouží úprava 8 h dat na začátku a na konci každého měsíce metodou vážených průměrů (ÚNMZ, 2011). Hodinová data RKR jednotlivých lokalit v ČR jsou počítána extrapolací dat RKR místně příslušných páteřních, popř. doplňkových stanic na základě oblastních regresních závislostí pro 5 základních prvků (teplota, tlak vodní páry, GLB, DIR a rychlost větru). Ostatní vlhkostní charakteristiky, tlak vzduchu a difúzní záření se dopočítávají z extrapolovaných základních prvků (Květoň, 2010).

### **Geografická závislost radiačních dat**

Kontrola vlivu vzdálenosti byla provedena pro denní sumy GLBd, DIFd a DIRd páteřních stanic RKR:

- do vzdálenosti 100 km (Obr. 18) od páteřní stanice (do 500 m n.m.) vykazuje GLBd v měsících březen až říjen přesnost do 5 %;
- do vzdálenosti 100 km od páteřní stanice (do 500 m n.m.) vykazuje GLBd v měsících listopad až únor přesnost do 10 %. Rozdíl je způsoben především tvorbou inverzní oblačnosti;
- DIFd a DIRd vykazují podobné výsledky.

Vertikální závislost GLB je na našem území způsobena především tvorbou oblačnosti. Je to způsobeno členitostí území a v zimním období nízkou inverzní oblačností. V rámci RKR je to zohledněno vertikálním gradientem  $\text{gradGLB}$ , který procentuálně zohledňuje výši GLB při extrapolaci dat RKR mezi zájmovým místem a příslušnou páteřní stanicí RKR (Květoň, 2010).

### **B.5.3 Meteororm**

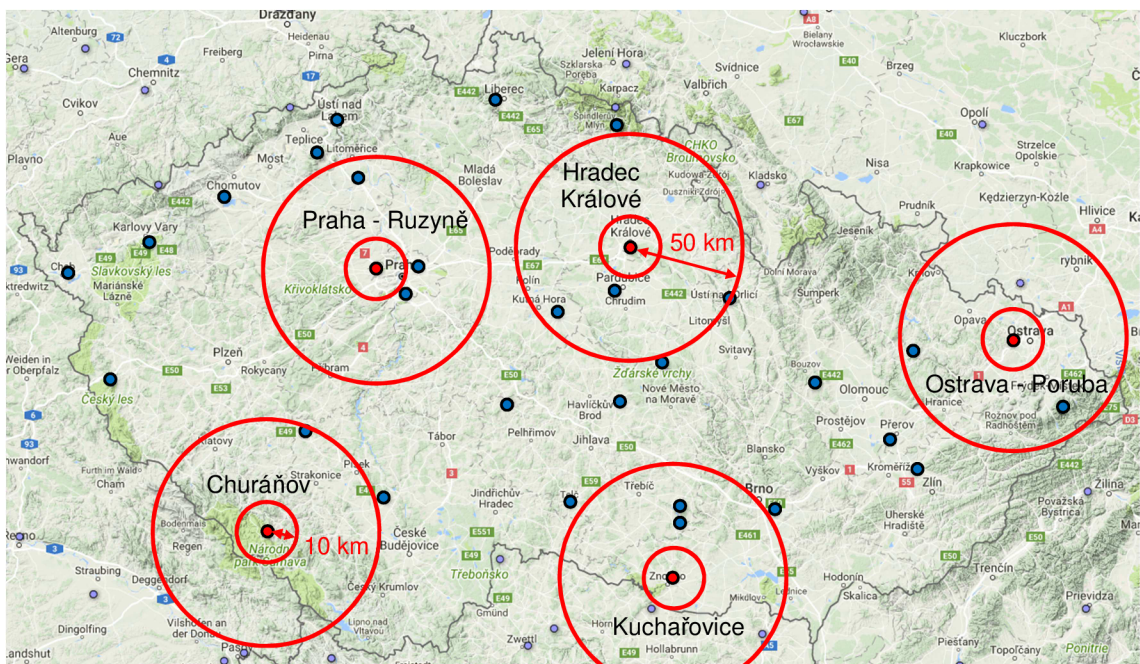
Meteororm je obsáhlá klimatologická databáze, která obsahuje kromě množství klimatologických údajů z celého světa také řadu výpočetních modelů pro jejich generování. Vyvinula ho společnost Meteotest, která působí již od roku 1981 v oblasti poskytovatele služeb o počasí, klimatu a životním prostředí. Meteororm je aplikace primárně určená k výpočtu slunečního ozáření na libovolně orientovanou plochu (Meteotest, 2018).

## Pozemní meteorologické stanice

Meteorologická data jsou použita z několika mezinárodních databází, které byly zkontrolovány a propojeny do komplexní databáze (Remund, 2017):

- GEBA (Global Energy Balance Archive) - sluneční záření z celého světa pro období 1991 - 2010 (hlavní zdroj těchto parametrů) ;
- WMO Climatological Normals - základní meteorologické parametry z období 1961 – 1990 (hlavní zdroj těchto parametrů) ;
- Globalsod (Global surface daily data) - základní meteorologické parametry z období 2000 - 2009;
- German Weather Service (DWD) - sluneční záření z období 1996 - 2015;
- Swiss database - globální sluneční záření a další meteorologické parametry z období 1983 – 1992;
- a další zdroje.

U některých stanic byla data rozšířena o údaje ze sousedních stanic pomocí diferenciálního postupu. Celkem databáze obsahuje data z 8351 stanic, z toho 1648 je v Evropě a zhruba na 1/3 stanic se měří sluneční záření. Na Obr. 19 je přehled využívaných meteorologických stanic v ČR (Meteonorm, 2018).



Obr. 19 - Meteorologické stanice v ČR využívané aplikací Meteonorm 7.2, červeně označené stanice s měřením slunečního záření (Meteonorm, 2018)

Pro období 1981 - 1990 a 1991 - 2010 jsou k dispozici údaje o solárním záření (1996 - 2015 pro Švýcarsko, Německo a Velkou Británii). Pro období 1961 - 1990 a 2000 - 2009 jsou k dispozici údaje pro ostatní meteorologické parametry.

## **Satelity**

V oblastech kde nejsou k dispozici data z pozemních meteorologických stanic se o doplnění údajů stará 5 geostacionárních družic. Pro Evropu jsou k dispozici snímky z 1 družice (Meteosat Second Generation satellite) s vysokým rozlišením (2 - 3 km) z období 2004 - 2010.

Meteorologická data se pro požadované místo získají interpolací z nejbližších 6 meteorologických stanic, pokud je jejich vzdálenost v Evropě menší než 10 km od daného místa. Pokud je vzdálenost v rozmězi 10 až 50 km, tak se použije kombinace dat z pozemních stanic a družic (Obr. 19). Při větší vzdálenosti se využívají pouze data z družice. Pro interpolaci globálního záření je použit tzv. 3D inverzní model vzdálenosti (Shepard's gravity interpolation), ostatní meteorologické parametry se interpolují podobným postupem.

Pro rozdělení globálního slunečního záření na přímé a difúzní aplikace využívá Meteonorm 2 modely (Remund, 2017):

- Perez model (Perez, 1991);
- BRL (Boland - Ridley - Lauret) model (Ridley, 2010).

## **C CÍLE PRÁCE**

### **C.1 Specifikace cílů práce**

Disertační práce řeší využití RKR pro návrh a hodnocení solárního termického systému. Využití hodinových klimatických dat je způsob jak optimalizovat návrh solárních termických systémů v daných klimatických podmínkách a lokalitě.

#### **Cíle práce:**

1. Monitorování solárního termického systému, vnitřního prostředí a klimatických podmínek na vybraném objektu
2. Porovnání GLB jednotlivých klimatických roků použitých v numerických simulacích
3. Numerická simulace solárního termického systému pro různé okrajové podmínky
4. Statistické porovnání měření a numerických simulací solárního termického systému

Ke splnění hlavních cílů disertační práce bylo potřeba vyřešit nejdříve dílčí úkoly a to:

- výběr vhodného objektu se solárním termickým systémem a zajistit dlouhodobý sběr dat systému;
- provést dlouhodobé měření klimatických podmínek a provozu vybraného objektu;
- rešerše dostupných simulačních softwarů termických solárních systémů, které umožňují manipulaci s klimatickými daty.

### **C.2 Prostředky pro dosažení cílů**

Hlavní část disertační práce se zabývá posuzováním využitelnosti RKR jako zdroje klimatických dat pro návrh a hodnocení solárního termického systému. Cílem bylo provést posouzení u reálného systému, který je využíván běžným provozem. Ve spolupráci s projekčním ateliérem ELAM, který se specializuje na energeticky úsporné budovy s využitím OZE, byl vybrán

objekt RD v obci Rapotice, kde je instalován teplovodní solární termický systém primárně pro ohřev teplé vody.

Ve spolupráci se společností Svoboda a spol. byl systém měření nastaven na dlouhodobý sběr dat o chodu celého systému. Budova byla dále vybavena měřicím zařízením pro dlouhodobé měření a záznam klimatických dat. Jednalo se o meteostanici, pyranometr pro měření globálního slunečního ozáření a řady čidel pro měření teploty a relativní vlhkosti venkovního vzduchu. Zároveň byl prováděn dlouhodobý odečet vodoměru TV a instalován digitální elektroměr pro měření spotřeby energie topné tyče akumulčního zásobníku solárního systému. Nákup dílčího měřicího zařízení byl financován z institucionálních studentských grantů VUT FAST a doktorského projektu GAČR.

Od švýcarské společnosti Vela Solaris (Polysun, 2018) byl zakoupen software Polysun EDUCATIONAL, ve kterém byly prováděny numerické simulace. Polysun obsahuje generátor klimatických dat Meteonorm a umožňuje import vlastních klimatických dat.

### **C.3 Důvody volby cílů**

S dnešním trendem zvyšujících se požadavků na energetické úspory či účinnosti energetických systémů je použití programů pro numerické simulace již nedílnou součástí navrhování budov. Všechny výpočetní programy ale vyžadují charakteristiky vnějšího a vnitřního prostředí, pomocí kterých jsou popsány okrajové podmínky matematického modelu systémů a konstrukcí budovy. Nedostatečná klimatická data a problematické popsání chování uživatelů u malých budov resp. komplikovaných a nedostatečně vyřešených systémů jsou největší zdroje chyb numerických simulací.

Práce je zaměřená na použití RKR jako zdroje klimatických dat z pozemních stanic, který poskytuje data průměrného klimatického roku pro celé území ČR. Především se jedná o data slunečního záření, která jsou finančně náročná na jejich pořízení a běžně je nahrazujeme daty z dostupných klimatických databází (kapitola B.5). Data jsou zpravidla kombinací pozemního a satelitního měření z důvodu velké vzdálenosti a tedy případné nepřesnosti pozemního měření. Pro ověření numerických simulací jsou použita i data z místního měření.



## **D MATERIÁL A METODIKA**

### **D.1 Výběr vhodného objektu**

Pro potřeby disertační práce byl vybrán vhodný objekt se solárním termickým systémem, který splňuje dále uvedené předpoklady:

- energeticky úsporná budova;
- malý solární systém s kapalinovými kolektory a s vodním solárním zásobníkem, který zastupuje běžně instalované systémy v RD v ČR s primárním účelem pro ohřev TV;
- budova umístěná v nadmořské výšce do 500 m n.m. (67 % území ČR - Květoň, 2010) aby data o slunečním záření RKR nebyla nadměrně ovlivněna vzdáleností zdrojových meteorologických stanic a oblačností vlivem nadmořské výšky;
- celoroční provoz solárního systému, tak jak je ovlivněn užíváním svého majitele;
- dlouhodobá spolupráce s majiteli objektu.

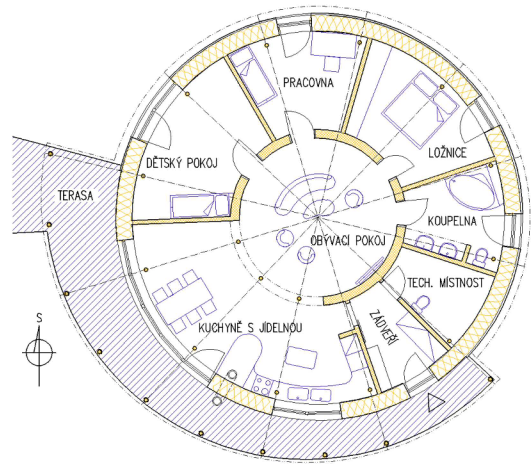
Ve spolupráci s Ing. arch. Mojmírem Hudcem z projekčního ateliéru ELAM bylo vytipováno několik vyhovujících objektů (RD Brno - Bystrc, RD v Rajhradě a RD v Rapoticích), které byly následně navštíveny a z nich byl vybrán posledně zmiňovaný objekt.

#### **D.1.1 Objekt RD v Rapoticích**

Jedná se o samostatně stojící jednopodlažní objekt válcovitého tvaru bez podsklepení se zelenou extenzivní plochou střechou. Nosná konstrukce stavby se skládá z vnitřního akumulčního vápenopískového jádra a 15 nosných dřevěných sloupů přiznaných v interiéru. Obvodová stěna je z nenosných lisovaných balíků slámy tl. 500 mm z vnitřní i z vnější strany opatřených hliněnou omítkou. Na části stavby je z exteriéru provedena větraná fasáda s dřevěným obkladem. Dvouplášťová plochá střecha je zateplena lisovanými balíky slámy tl. 800 mm a střed je doplněn foukanou celulózou. Stavba je postavena na ŽB základové desce tl. 250-270 mm, která je založena na granulátu z pěnového skla tl. 500 mm.



Obr. 20 - RD v Rapoticích (foto autora)



Obr. 21 - Dispozice RD (ELAM, 2010)

Budova je obývána od října 2011 mladou rodinou, která se v průběhu probíhajícího měření rozšířila o dalšího člena. Manželé V. dojíždějí do Brna do práce, takže odběr TV ze solárního zásobníku je především v ranních a večerních hodinách a o víkendu.

Tab. 6 - Technické parametry budovy RD v Rapoticích

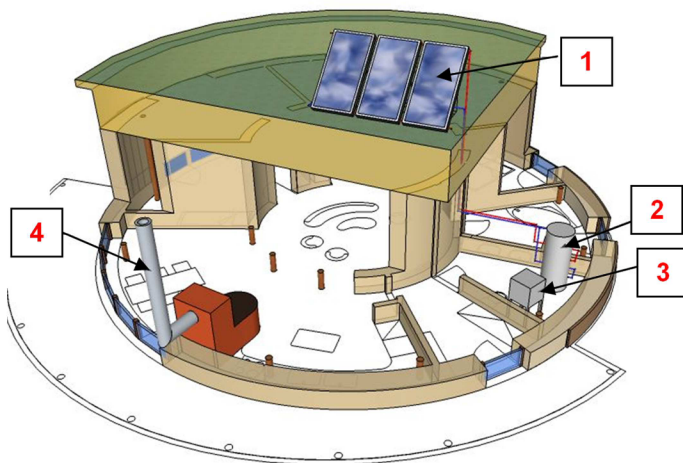
Technická data		
1	Objem budovy	651,1 m <sup>3</sup>
2	Celková ochlazovaná plocha obálka budovy	484,6 m <sup>2</sup>
3	Objemový faktor tvaru budovy A/V	0,74
4	Energeticky vztáhná plocha	149,4 m <sup>2</sup>
5	Počet obyvatel	2 + 1 (od 2014: 2 + 2)
6	Nadmořská výška podlahy 1NP	493,8 m n.m.
7	Měrná potřeba tepla na vytápění	15 kWh·m <sup>-2</sup> ·rok <sup>-1</sup> (dle projektové dokumentace, PHPP)
Technické parametry obálky budovy		
1	U - Podlaha, stěna a střecha	0,08 - 0,13 W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup>
2	U - otvorové výplně dřevěné s izolačním trojsklem	0,71 - 0,87 W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup>
3	Vzduchotěsnost n <sub>50</sub> (VUT FAST - měřeno před úpravami)	0,81 h <sup>-1</sup>
Technologie v budově		
1	Zdroje tepla vytápění	Akumulační kamna, elektrické podlahové vytápění 0,4 kW a dodatečně olejové otopné těleso 1,5 kW
2	VZT jednotka	ILTO W80 EC Econo - AL protiproudý výměník

### D.1.2 Solární termický systém RD v Rapoticích

Na ploché střeše jsou nainstalovány 3 ploché kapalinové kolektory SK 218 FreeSun (podrobně viz Příloha L.5) se sklonem 45°, optimálně orientované na jih. V roce 2013 Strojní fakulta ČVUT odkoušela tepelný výkon kolektorů dle ČSN EN 12975-2 (Solární kolektor, 2018). Kolektory jsou napojeny pomocí měděného potrubí primárního (solárního) okruhu na solární akumulční zásobník. Délky potrubí:

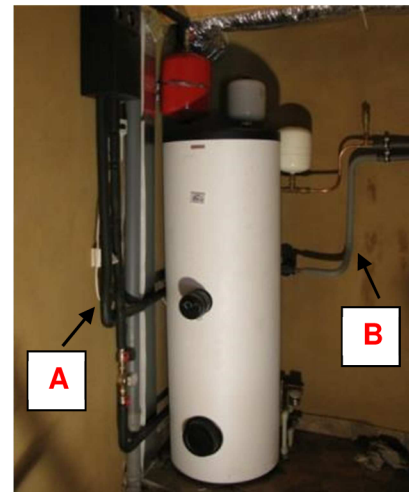
- přívodní potrubí 8250 mm (exteriér 2500 mm);
- zpětné potrubí 12750 mm (exteriér 5350 mm).

Rozvody primárního okruhu jsou zatepleny pomocí návlekové izolace z EPDM. Solární akumulční zásobník OKC 300 NTRR/SOL (podrobně viz Příloha L.6) má 2 integrované trubkové výměníky a dotápěcí elektrickou tyč.



**1** - termické kolektory SK 218; **2** - akumulční zásobník OKC; **3** - VZT jednotka ILTO W80; **4** - akumulční kamna

Obr. 22 - Schéma solárního systému



A - primární okruh, B - VZT okruh

Obr. 23 - Solární akumulční zásobník (foto autora)

Solární akumulční zásobník je přes horní trubkový výměník napojen na VZT jednotku s topným registrem sloužícím k dohřevu přiváděného vzduchu z VZT jednotky. Registr je umístěn za tepelným výměníkem VZT jednotky. Propojení je provedeno pomocí měděného potrubí, které je zatepleno návlekovou izolací z PE. Délka potrubí:

- přívodního potrubí 2900 mm;
- zpětné potrubí 3350 mm.

Oběh topné vody zajišťuje oběhové čerpadlo, které je řízeno pomocí prostorového termostatu s přednastavenou řídicí teplotou. VZT okruh ve vzduchotechnické jednotce je osazen před topným registrem plně otevřenou termoregulační hlavicí s kapilárou.

Tab. 7 - Vybrané technické parametry solárního termického systému a VZT okruhu RD

<b>Solární termické kolektory SK 218 FreeSun</b>		
1	Plocha absorberu	2,018 m <sup>2</sup>
2	Absorbér (BlueTec)	Celoměděný se selektivním povrchem
3	Optická účinnost (čiré zasklení)	79 %
4	Průtočné množství kapaliny	30 - 400 l·h <sup>-1</sup>
<b>Solární akumulční zásobník OKC 300 NTRR/SOL</b>		
1	Objem vody	275 l
2	Plocha/objem spodního výměníku	1,5 m <sup>2</sup> / 10,5 l
3	Plocha/objem horního výměníku	1,0 m <sup>2</sup> / 7,0 l
4	Elektrická topná tyč	2 kW
5	Plášť zásobníku	Smaltovaný ocelový plech
6	Tepelná izolace zásobníku	PUR tl. 50 mm
<b>Řízení a nastavení systému</b>		
1	Regulace	Programovatelná jednotka UVR 61-3
2	Objemový průtok primárního okruhu	až 110,7 l·m <sup>-2</sup>
3	Čidlo objemového průtoku (pulzní)	VSG 1,5
<b>Další prvky systému</b>		
1	Návleková TI primárního okruhu	EPDM Aeroflex SSH 13x18 mm
2	Návleková TI VZT okruhu	PE tl. 9 mm
3	Rozvody primárního a VZT okruhu	CU Suparsan 18x1 mm
4	Teplonosná látka primárního okruhu	KOLEKTON P SUPER na bázi monopropylenglykolu
5	Čerpadlo primárního okruhu	Wilo Star 15/6
6	Čerpadlo VZT okruhu	Wilo Star Z NOVA

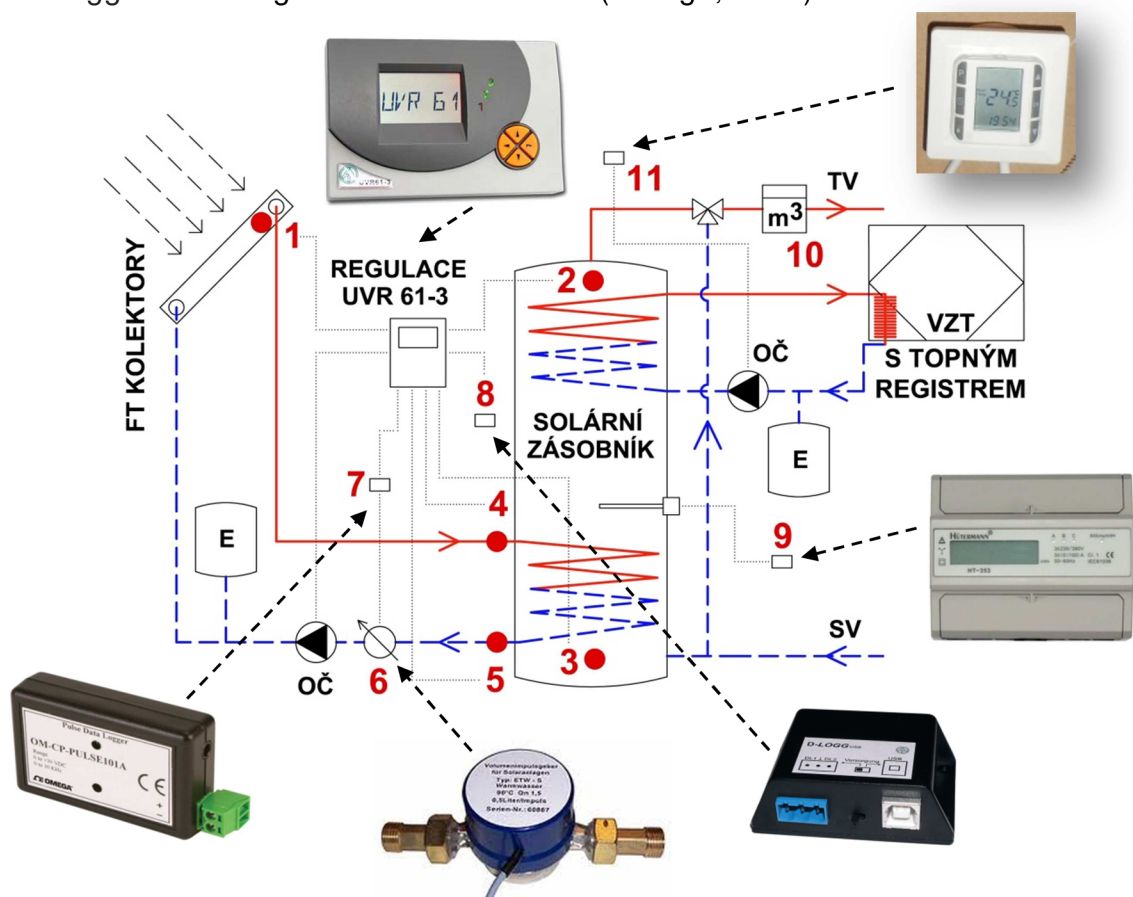
### D.1.3 Monitoring solárního termického systému

Na podzim roku 2011 byla ve spolupráci se společností SUNPOWER s.r.o. (Sunpower, 2018), která je generálním dodavatelem regulací od rakouské společnosti Technische Alternative, provedena instalace nové programovatelné regulace UVR 61-3 a čidla objemového průtoku VSG 1,5 (TA, 2018) s příslušenstvím teplotních čidel typu PT1000 pro detailní monitoring celého solárního systému.

Programovatelná jednotka UVR 61-3 má v sobě integrovaný měřič tepla (kalorimetr) a je schopna zaznamenávat data až 6 čidel (teplota, průtok, ozáření apod.). Ve spolupráci s dataloggerem D-LOGGusb (TA, 2018) je schopna zaznamenávat dlouhodobě měřená data.

Dataloger D-LOGGusb je napojen na jednotku UVR 61-3 pomocí dvoupólového datového spoje DL. Pro evidenci a vyhodnocení naměřených dat slouží software Winsol (TA, 2018). Záznam dat probíhal v 30minutovém intervalu.

Čidlo objemového průtoku VSG 1,5 dosahuje při průtoku  $600 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$  odchylku měření do 1 %. Průtok se měří pomocí počtu výstupních impulzů zaznamenaných regulací UVR 61-3, kde se provede přepočít v poměru 1 impuls na 0,5 litru tekutiny v primárním okruhu. Čidlo bylo vybaveno dataloggerem Omega OM-CP-Pulse101A (Omega, 2018).

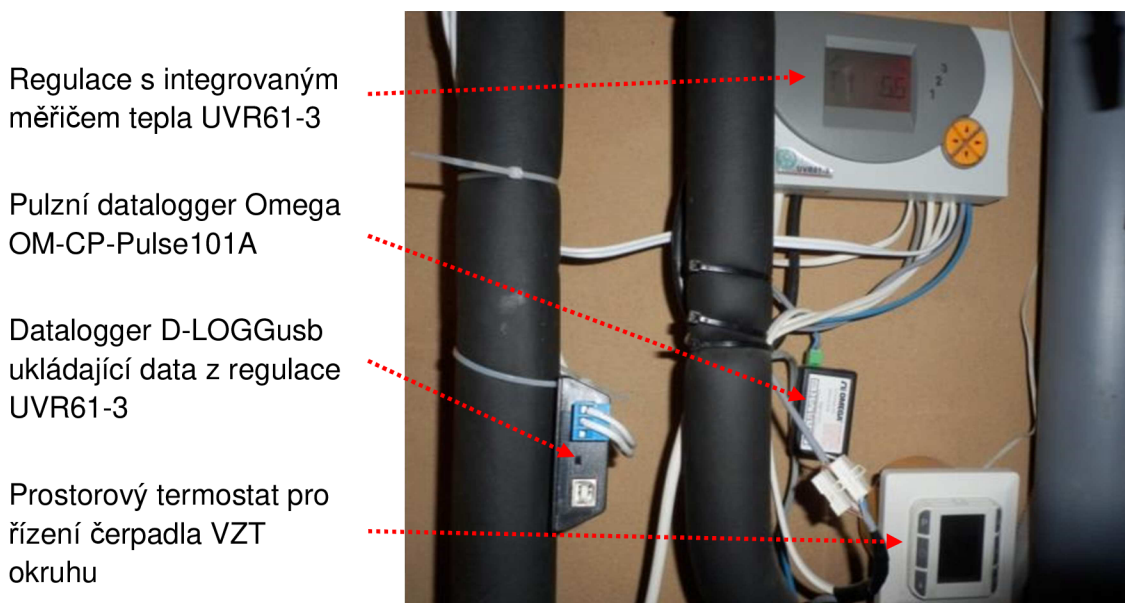


**1-5** - teplotní čidlo; **6** - čidlo objemového proudu VSG 1,5; **7** - pulzní datalogger Omega OM-CP-Pulse101A; **8** - datalogger D-LOGGusb; **9** - třífázový elektroměr HT-353D; **10** - Vodoměr SENSUS Residia Jet, **11** - Prostorový termostat

Obr. 24 - Schéma řízení a monitoringu solárního termického systému

Třífázový jednosazbový podružný digitální elektroměr HT-353D, umístěný v zádveři, slouží pro měření spotřeby energie elektrické topné tyče umístěné v akumulčním solárním zásobníku.

Zmiňované a další zařízení bylo v letech 2012 až 2014 spolufinancováno z institucionálních studentských grantů VUT FAST č. FAST-J-12-1757 Modelování a hodnocení energeticky pasivního domu a FAST-J-13-2035 Hodnocení energetické náročnosti a vnitřního mikroklimatu energeticky pasivního domu, a dále z doktorského projektu GAČR č. GD101/09/H050 Výzkum energeticky úsporných zařízení pro dosažení pohody vnitřního prostředí.



Obr. 25 - Řízení a umístění dataloggerů na stavbě

#### D.1.4 Monitoring vnitřního prostředí budovy

Pro dlouhodobé měření vnitřního prostředí a energetické náročnosti byla budova osazena řadou dataloggerů, nejen těch co jsou uvedeny dále. Na měření spolupracovalo několik studentů doktorského studijního programu a zaměstnanců VUT FAST ÚPST.

Pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu v interiéru byly použity dataloggery:

- OMEGA OM-EL-USB-2 (Omega, 2018) - přesnost  $\pm 0,5$  °C,  $\pm 3,5$  % (v rozsahu 20 až 80 %)

- OMEGA OM-PLTH (Omega, 2018) - přesnost  $\pm 1,0$  °C,  $\pm 2,0$  % (v rozsahu 0 až 95 %)



Obr. 26 - OM-EL-USB-2 (foto autora)



Obr. 27 - OM-PLTH (foto autora)

Dataloggery byly umístěny v budově pod stropem v průběžně měnícím se počtu. Záznam dat byl prováděn v 60minutovém intervalu. Data o teplotě v interiéru se pro numerické simulaci využili jako vnitřní okrajová podmínka.

## D.2 Měření vybraných klimatických parametrů na RD

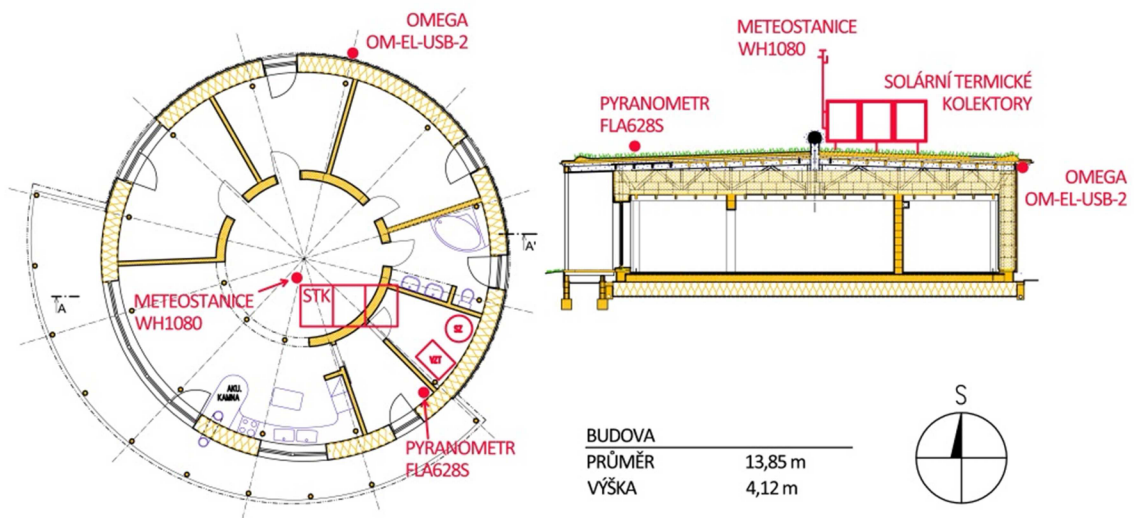
Pro potřeby porovnání s klimatickými roky bylo na střešní konstrukci posuzované budovy umístěno několik zařízení pro dlouhodobé sledování vybraných klimatických parametrů. Sledované parametry byly vybrány pro potřeby numerické simulace.

### D.2.1 Monitoring venkovního prostředí

Na konzolu umístěnou na nosné konstrukci solárních termických kolektorů byla umístěna venková jednotka meteostanice WH1080 se sestavou senzorů pro měření celkem 10 klimatických parametrů včetně teploty, relativní vlhkosti vzduchu a rychlosti větru (Příloha L.7). Vnitřní jednotka (datalogger) s možností bezdrátového přijímání a uchování dat byla umístěna v budově. Záznam dat byl prováděn v 60minutovém intervalu.

Na severní část fasády pod přesah střechy byl umístěn datalogger Omega OM-EL-USB-2 pro měření teploty a relativní vlhkosti venkovního vzduchu, aniž by měření bylo ovlivněno přímým slunečním zářením. Záznam dat byl

prováděn v 60minutovém intervalu. Umístění měřícího zařízení je znázorněno na Obr. 28.



Obr. 28 - Umístění měřících zařízení na budově

## D.2.2 Monitoring globálního slunečního ozáření

Sluneční záření je nejdůležitější složkou klimatických podmínek, které mají vliv na provoz solárního termického systému. Právě variabilita slunečního záření je největší neznámou při návrhu systému. Pro kvalitní data o slunečním záření na sledovaném místě je potřeba alespoň 10leté měření. Tato data nejsou zpravidla k dispozici kvůli finanční náročnosti. Ale i krátkodobé měření v řádu několika let nám dokáže poskytnout věcné informace o dané lokalitě.

Na střešní konstrukci budovy byla umístěna platforma s pyranometrem FLA628S (Příloha L.7) pro měření globálního slunečního ozáření.

Tab. 8 - Vybrané technické parametry pyranometru Ahlborn FLA628S (Ahlborn, 2018)

#	Parametr	Jednotky
1	Měřící rozsah	0 až 1500 W·m <sup>2</sup>
2	Rozlišení měření	0,1 W·m <sup>2</sup>
3	Spektrální rozsah měření	0,3 až 3,0 μm
4	Přesnost měření	Σ řádků 5 až 7
5	Cos-efekt	max. 3 % z měřené hodnoty
6	Azimut-efekt	max. 3 % z měřené hodnoty
7	Teplotní vliv	max. 1 % z měřené hodnoty (při teplotním rozsahu -20 °C až +40 °C)
8	Pracovní teplota	-40 °C až +60 °C
9	Čas odezvy (T95)	25 sekund
10	Kryt	1x broušené sklo



Pro záznam dat byl použit datalogger Almemo 2590-4S s externí pamětí SD (Příloha L.7) umístěný uvnitř budovy. Propojení zařízení bylo zajištěno pomocí prostupů skrze střešní konstrukci pro vedení primárního kruhu solárního systému. Srovnávací měření pyranometru proběhlo na půdě VUT FAST. Porovnávalo se měření pyranometru FLA628S s měřením permanentní družicové stanice TUBO (TUBO, 2018), kde je umístěn pyranometr CMP3 (Kipp & Zonen, 2018). Rozdíl měření byl v desítkách  $W \cdot m^2$ , takže shoda byla dostatečná pro potřeby měření. Umístění pyranometru je znázorněno na Obr. 28. Záznam dat byl prováděn:

- **1. etapa** - únor až prosinec 2013 v intervalu 20 minut;
- **2. etapa** - prosinec 2013 až listopad 2015 v intervalu 4 minut. Změna byla zapříčiněna instalací externí karty SD pro zvýšení kapacity paměti dataloggeru.

### D.2.3 Model výpočtu difúzní složky globálního záření

Klimatické podmínky měřené přímo na sledovaném objektu (globální sluneční záření, parametry venkovního vzduchu apod.) mají sloužit jako kontrolní varianta solárního termického systému při porovnání s vybranými klimatickými roky v numerických simulacích. Z důvodu časové a finanční náročnosti nemohlo dojít k měření přímé ani difúzní složky slunečního záření. Bylo potřeba vybrat vhodný separační model pro výpočet difúzní slunečního záření z měřených hodnot globálního slunečního ozáření pro danou lokalitu.

Byla provedena literární rešerže s cílem nalézt vhodné separační modely pro sledovanou lokalitu obce Rapotice ve střední Evropě, porovnat je a vybrat nejvhodnější z nich.

Jak již bylo zmiňováno v kapitole B.2.4, nevýhodou separačních modelů je, že vznikají na základě měření z pouze několika lokalit, které jsou ovlivněny místními podmínkami (stejně albedo, prach v ovzduší a další). Jedním z řešení je použití více proměnných, které charakterizují danou lokalitu.

Návrhy solárních systémů a jejich energetické a ekonomické hodnocení vyžadují co nejpřesnější údaje o slunečním záření. Z důvodu nedostatečného pokrytí zemského povrchu měřícími stanicemi, které by měřily dílčí složky

slunečního záření, jsou často k dispozici pouze měření globálního ozáření či satelitní data. Z těchto důvodů je nutné použít co nejpřesnější separační model. V 90. letech se do separačních modelů začaly přidávat tzv. proměnné variability, které zohleňovaly vývoj globálního záření. Obecně se dá říci, že modely s tímto řešením variability dosahují lepších výsledků (Gueymard, 2016).

### **D.3 Software pro numerickou simulaci**

V dnešní době existuje řada softwarů, pomocí kterých se navrhují solární termické systémy. Softwary se liší v celé řadě aspektů, především se jedná o cenu, knihovny prvků (počet komponent), ze kterých v softwaru sestavujeme model a další. Pro potřeby disertační práce bylo třeba vybrat vhodný software pro numerické simulace solárního termického systému, který bude splňovat řadu kritérií stanovených v rámci přípravných prací:

- cenově (komerčně) dostupný;
- uživatelsky nekomplikované pracovní prostředí;
- bude umožňovat práci s klimatickými daty (import);
- bude umožňovat práci s daty komponent systému v hodinovém kroku.

I když software TRNSYS byl vyvinut již v 70. letech minulého století, stále je považován za nejpřesnější nástroj pro návrh solárních systémů. Nevýhodou TRNSYSu je jeho uživatelská náročnost a cena, takže není vhodný pro běžné komerční využití. Z těchto důvodů softwaru využívají především výzkumné instituce a konzultační subjekty.

Na základě výběrových kritérií byl z dostupných softwarů vybrán POLYSUN ve verzi Educational. Jedná se o verzi se všemi moduly, v samotné práci se však využívá pouze Solarthermal modul. Software byl porovnáván jak s experimentálním měřením, tak i se simulacemi v dalších softwarech, a dosahuje dobrých přesností v řádu 5 až 10% (Kalogirou, 2014). V publikaci (Sotnikov, 2017) je provedeno přímé porovnání solárního systému pro vytápění a ohřev TV ve Švédsku se softwarem TRNSYS 17 citlivostní analýzou vybraných parametrů pomocí klimatických dat z aplikace Meteonorm.

Referenční hodnotou bylo přímé monitorování systému. Relativní odchylky ročních klíčových hodnot pro TRNSYS a Polysun jsou < 2 % resp. < 8 %.

Jedná se již o poměrně rozšířený simulační nástroj, který je běžně využíván při návrhu staveb. Důkazem je provedený mezinárodní průzkum mezi stavebními odborníky zpracovaný v rámci projektu IEA-SHC Task 41 - Solar Energy and Architecture (Kanters, 2014).

### D.3.1 Klimatická data pro numerické simulace

Pro potřeby přímého a statistického porovnání naměřených hodnot solárního termického systému s numerickou simulací v programu Polysun Educational byly použity 2 hlavní sady klimatických dat:

- **Varianta A - RKR**

zakoupený referenční klimatický rok pro ČR od Českého hydrometeorologického ústavu prostřednictvím webového portálu (CHMI - RKR, 2018)

- **Varianta B - Meteonorm**

vygenerovaný klimatický rok z databáze Meteonorm 7.2 pomocí softwaru Polysun Educational 10

Obě hlavní sady klimatických dat budou použity pro 2 různé odběrové profily TV uvedené v Tab. 12.

Jako doplňkové sady klimatických dat byly sestaveny 2 klimatické testovací roky z klimatických dat naměřených přímo na vybraném objektu RD v Rapoticích:

- **Varianta C - I. testovací rok**, období 19.2 2013 až 18.2 2014 (2013/2014)

- **Varianta D - II. testovací rok**, období 5.6 2014 až 4.6 2015 (2014/2015)

Doplňkové varianty C a D mají sloužit jako testovací klimatické roky pro kontrolu přesnosti softwaru Polysun. Naměřená data byla porovnána s numerickou simulací, která je založena na okrajových klimatických podmínkách měřených přímo na stavbě v době probíhajícího měření solárního termického systému.

## D.4 Statistická analýza

Řešená disertační práce obsahuje u měřených parametrů a výsledků numerických simulací velké množství hodinových dat. Porovnání velkého množství dat běžným vizuálním pozorováním je nedostatečné a zavádějící. U dílčích parametrů je tedy provedeno statistické porovnání dle několika základních statistických metod v relativních hodnotách, které byly vybrány z velkého množství metod dostupných v literatuře. Z důvodu porovnávání odhadovaných a měřených parametrů, které ovšem samy jsou zatíženy chybou (nejistotou) měření, se používá termín odchylka (deviation), než běžně používaná chyba (error).

- **Relativní střední odchylka (rMBD - relative Mean Bias Deviation)**

Jedná se o vhodný indikátor systematické odchylky. Tedy určení podhodnocení či nadhodnocení porovnání.

$$rMBD = \frac{1}{n \cdot \bar{y}} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) \cdot 100 [\%] \quad R.11$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad R.12$$

Kde	$\hat{y}_i$	veličina odhadovaná (vypočítaná)
	$y_i$	veličina měřená
	$\bar{y}$	výběrový průměr měřené veličiny
	$n$	počet hodnot veličiny

- **Relativní průměrná absolutní odchylka (rMAD - relative Mean Absolute Deviation)**

Statistická metoda, která se používá pro hodnocení průměrné odchylky porovnání.

$$rMAD = \frac{1}{n \cdot \bar{y}} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \cdot 100 [\%] \quad R.13$$

- **Relativní směrodatná odchylka (rRMSD** - relative Root Mean Square Deviation)

Jedná se o často používanou míru rozdílu mezi odhadovanými (výpočtovými) a měřenými hodnotami. Jedná se také o nástroj pro hodnocení nesystematické chyby, protože dává větší váhu velkým odchylkám (Wilks, 2006).

$$rRMSD = \frac{1}{\bar{y}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \cdot 100 [\%] \quad R.14$$

Všechny 3 uvedené odchylky uvádějící rozdíl mezi veličinou odhadovanou a měřenou by měly dosahovat hodnot co nejbližší 0.

- **Pearsonův korelační koeficient R**

Jedná se o základní statistickou metodu, která popisuje vzájemný vztah 2 veličin. Nabývá hodnot z intervalu [-1; 1]. Korelační koeficient R je velmi ovlivněn odlehlými či extrémními hodnotami veličin (Hendl, 2012).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad R.15$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad R.16$$

Kde  $\bar{x}, \bar{y}$  výběrový průměr veličiny

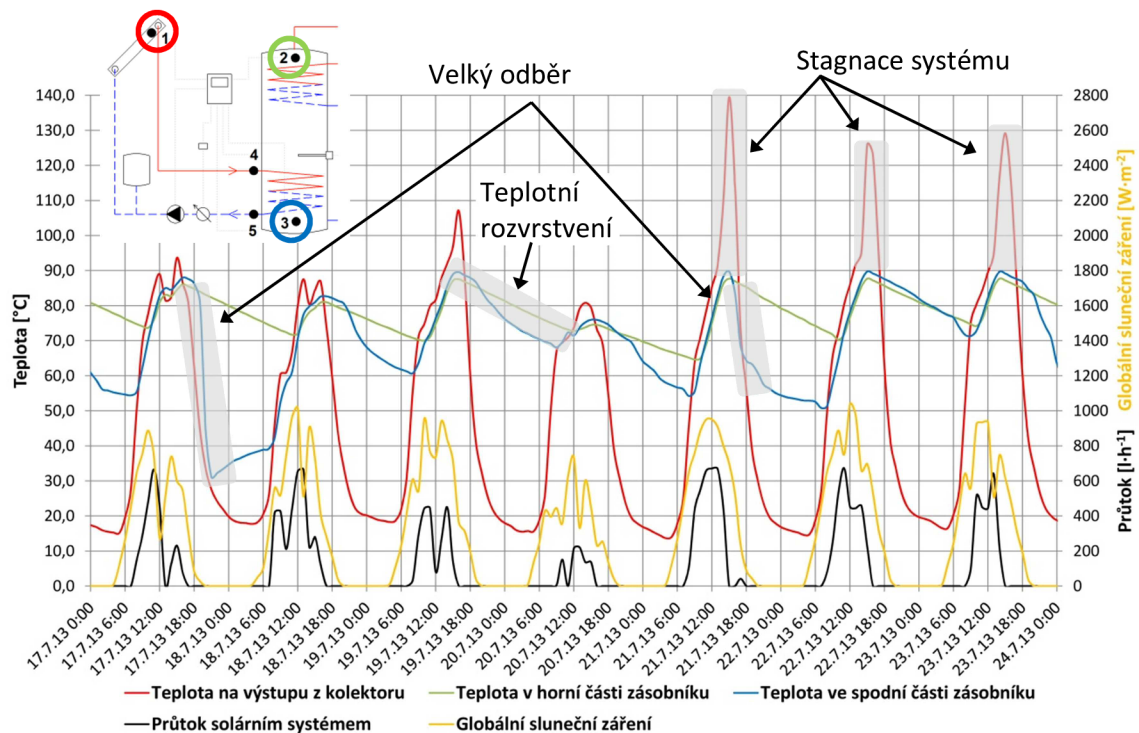
## E VÝSLEDKY A DISKUZE

### E.1 Monitorování solárního termického systému, vnitřního prostředí a klimatických podmínek na vybraném objektu

#### E.1.1 Monitoring solárního termického systému

Monitoring solárního systému popsaného v kapitole D.1.3 pomocí regulace UVR 61-3 probíhal v období 4.6 2012 až 28.7 2015. Jedná se tedy o více než 3leté kontinuální měření v hodinovém kroku záznamu dat.

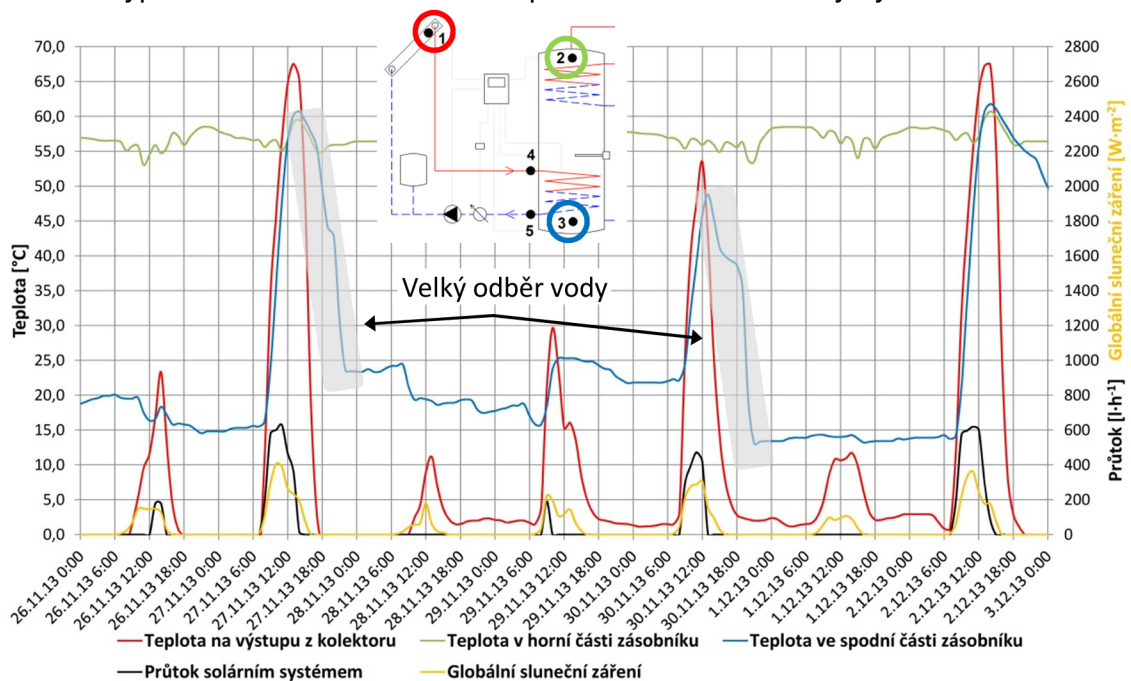
Porovnání monitoringu za celé sledované období s numerickou simulací bylo provedeno v kapitole E.4 dle navržených statistických metod. Níže na Obr. 29 a Obr. 30 je uvedena ukázka pro letní resp. zimní období, kde je popsáno chování systému během provozu.



Obr. 29 - Záznam měření solárního termického systému v letním období 17. až 24.7 2013

Z Obr. 29 je patrné, že solární termický systém dokáže v letním období vyhrát celý zásobník na 90 °C za pár hodin. Z důvodu nepravidleného odběru TV mladé rodiny, který je především ve večerních a ranních hodinách, a malého objemu solárního zásobníku poté nastává stagnace, která snižuje životnost a celkovou účinnost solárního systému. Ke stagnaci běžně dochází již v brzkých

poledních hodinách, není tedy vyčerpán plný potenciál solárního termického systému. Ve večerních hodinách dochází k většímu odběru TV, což je patrné ze snížení teploty ve spodní části zásobníku, způsobené přítokem studené vody z vodovodního řadu. V letním období prakticky nedochází k rozvrstvení teploty v zásobníku. To je způsobeno především velkou plochou termických kolektorů a malým objemem solárního akumulačního zásobníku. Pokud k teplotnímu rozvrstvení dochází, je to způsobeno pouze větším odběrem TV, zpravidla způsobené napuštěním velkoobjemové dřevěné vany. Z pravidelného kolísání teploty v horní části zásobníku je patrné, že topná elektrická tyč je v letním období vypnutá a k ohřevu TV slouží pouze solární termický systém.



Obr. 30 - Záznam měření solárního termického systému v zimním období 26.11 až 3.12 2013

V zimním období je výrazný teplotní rozdíl v akumulačním zásobníku (cca 40 °C), mezi prakticky konstantní teplotou v horní části zásobníku zajištěnou elektrickou topnou tyčí a velmi proměnlivou teplotou ve spodní části zásobníku. Nízká teplota ve spodní části zásobníku zajišťuje, že i při malých hodnotách globálního slunečního ozáření solární termický systém přispívá k ohřevu TV. Dílčí výsledky z měření jsou dále popsány v publikaci (Jelínek, 2014).

Tab. 9 ukazuje časový podíl stagnace solárního termického systému, tedy stav kdy je v solárním zásobníku dosažena maximální přípustná teplota a solární systém je odstaven z důvodu bezpečnosti.

Tab. 9 - Časový podíl stagnace solárního termického systému

Počet dní stagnace													
Měsíc / rok	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	%
2012/2013	5	8	12	6	0	0	0	0	0	0	2	0	9,0
2013/2014	5	15	12	2	1	0	0	0	0	0	0	2	10,1
2014/2015	4	3	2	3	0	0	0	0	0	1	0	2	4,1

V letním období roku 2014 je dosaženo méně stagnací solárního systému. Důvodem je především menší množství slunečního ozáření, jak je patrné z Obr. 35, ale i větší odběr TV, způsobený narozením druhého potomka v roce 2014.

Tomu odpovídají i hodnoty z Tab. 10 a Tab. 11, kde je dosaženo zvýšeného využívání solárního termického systému vlivem větší spotřeby TV a většího zapojení elektrické topné tyče v rámci dohřevu TV v období s menšími úhrny slunečního ozáření.

Tab. 10 - Časový podíl bez ohřevu TV solárním termickým systémem

Počet dní bez solárního termického systému													
Měsíc / rok	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	%
2012/2013	0	2	2	5	7	16	14	21	10	11	1	4	28,2
2013/2014	3	0	1	3	5	13	17	20	7	3	0	1	20,0
2014/2015	0	0	4	5	12	21	12	13	5	0	2	2	20,8

Tab. 11 - Časový podíl ohřevu TV elektrickou topnou tyčí

Počet dní ohřevu TV dodatkovým zdrojem tepla													
Měsíc / rok	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	%
2012/2013	4	0	0	0	20	30	31	31	28	31	12	9	53,7
2013/2014	0	0	0	14	20	29	31	31	27	31	27	5	58,9
2014/2015	3	2	4	9	21	30	31	31	28	24	25	18	61,9

Zelené podbarvení odpovídá období I. testovacího roku a modré odpovídá II. testovacímu roku (také Tab. 12)



V Tab. 12 je uveden záznam měření spotřeby TV v období srpen 2011 až květen 2014. Protože pro období II. testovacího roku nebyl proveden záznam a spotřeba TV je důležitým vstupním údajem pro numerickou simulaci solárního termického systému, byla tato data odhadnuta na základě zvýšené spotřeby TV z měřeného období roku 2014 oproti předešlým rokům měření. Toto navýšení bylo způsobeno již zmíněným narozením druhého dítěte a tedy zvýšením trvalého počtu osob v budově. Data spotřeby TV byly průměrně navýšena o 30% oproti předešlým rokům.

Tab. 12 - Měření spotřeby teplé vody sledovaného objektu

Měsíc	Počet dní	Spotřeba teplé vody [m <sup>3</sup> ]					Odběrný profil [l·den <sup>-1</sup> ]	
		2011	2012	2013	2014	2015	2013/ 2014	2014/ 2015
01	31		3,27	4,10	5,16	5,16	166,5	166,5
02	28		3,09	3,70	4,23	4,23	151,1	151,1
03	31		2,88	2,54	4,69	4,69	81,9	151,3
04	30		2,70	3,82	4,54	4,54	127,3	151,3
05	31		3,10	3,94	4,22	4,22	127,1	136,1
06	30		2,32	2,54	3,30		84,7	110,1
07	31		2,39	2,63	3,42		84,8	110,3
08	31	2,59	2,39	2,38	3,09		76,8	99,8
09	30	2,80	3,38	3,01	3,91		100,3	130,4
10	31	3,10	2,77	2,97	3,86		95,8	124,5
11	30	3,60	3,58	3,16	4,11		105,3	136,9
12	31	3,51	3,70	4,00	5,20		129,0	167,7
Celková / průměrná spotřeba		15,60	35,57	39,57	49,74	22,84	110,9	136,3

*Pozn.: za sledované období je spotřeba vody na hlavním vodoměru 326 m<sup>3</sup>*

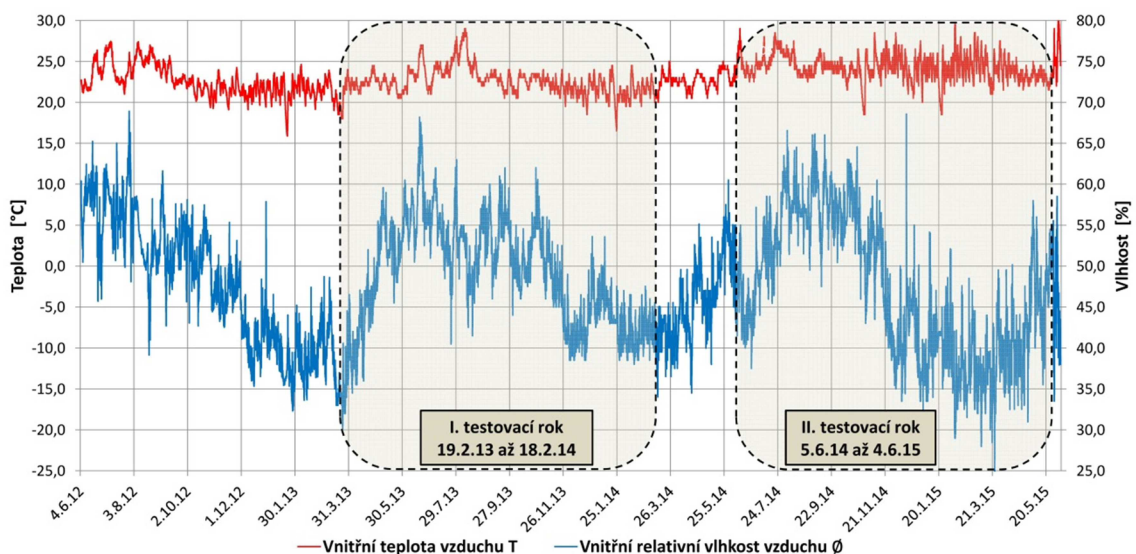
V Tab. 13 je uvedeno měření spotřeby energie elektrické topné tyče pro období květen 2014 až září 2015. Monitoring obou zmíněných měření je blíže popsán v kapitole D.1.3.

Tab. 13 - Měření spotřeby energie elektrické topné tyče solárního akumulčního zásobníku

Měsíc	Počet dní	Spotřeba energie [kWh]			Průměrná spotřeba energie [kWh·den <sup>-1</sup> ]	
		2013	2014	2015	2014	2015
01	31			381,1		12,3
02	28			377,4		13,5
03	31			234,8		7,6
04	30			90,0		3,0
05	31		1339,7	70,3		2,3
06	30		29,2	0,8	1,0	0,03
07	31		22,9	0,0	0,7	0,0
08	31		51,4	0,0	1,7	0,0
09	30		84,2	87,4	2,8	2,9
10	31		145,9		4,7	
11	30		359,5		12,0	
12	31	326,5	320,2		10,3	
Celková / průměrná spotřeba energie		326,5	2353,0	1241,8	4,7	4,6

### E.1.2 Měření vnitřního prostředí RD

V zimním období vnitřní teplota vzduchu (Obr. 31) posuzovaného RD výrazně cykluje vlivem hlavního zdroje tepla, kterým jsou akumulční kamna na pevné palivo. Zpravidla se vytápí principem večerního zátoku, kdy kamna naakumulují teplo a po dobu cca 2 dny uvolňují akumulované teplo do interiéru.



Obr. 31 - Průběh teploty a relativní vlhkosti vzduchu v interiéru RD Rapotice

Chování vnitřního prostředí RD a vlivu hliněných omítek na něj byl popsán v publikaci (Lišková, 2015). V Tab. 14 jsou uvedeny rozsahy teplot v interiéru po celý rok a jejich stanovené střední hodnoty použité jako vnitřní okrajové podmínky numerické simulace.

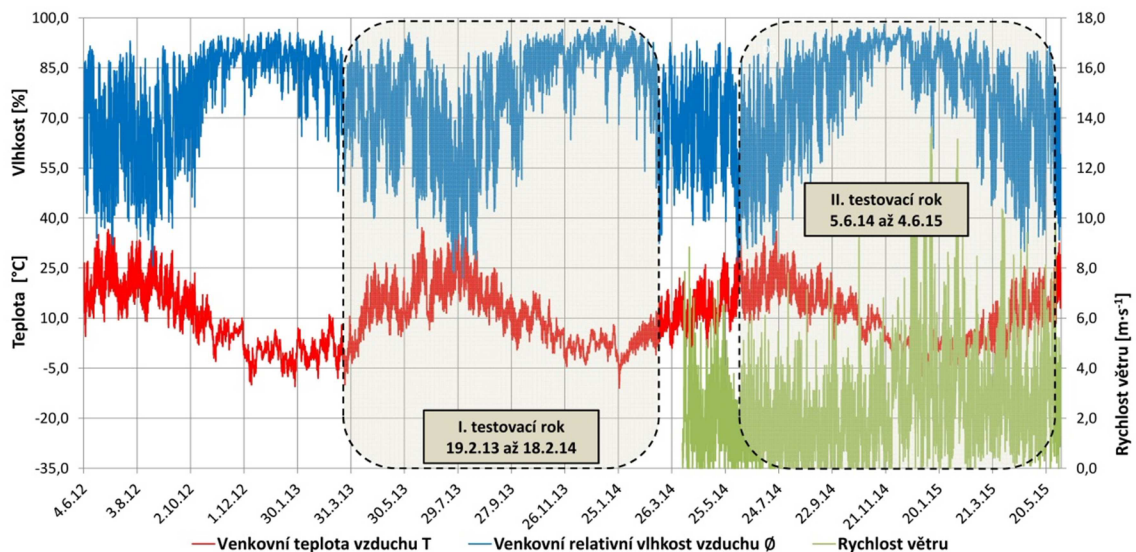
Tab. 14 - Stanovení průměrné teploty vzduchu v interiéru pro I. a II. testovací rok

#	Období	Teplotní rozsah $T_i$ [°C]	Střední hodnota $T_i$ [°C]
I. testovací rok	19.2 2013 až 18.4 2014	16,5 až 29,0	22,5
II. testovací rok	5.6 2014 až 4.6 2015	18,5 až 30,5	24,2

### E.1.3 Měřené klimatické podmínky RD

#### Teplota a relativní vlhkost vzduchu a rychlost větru

Z důvodu věrohodnosti a konzistence měřící řady relativní vlhkosti a teploty vzduchu v exteriéru byla použita data z dataloggerů OMEGA OM-EL-USB-2. Z dat meteostanice WH1080 byly použity pouze údaje o rychlosti větru.

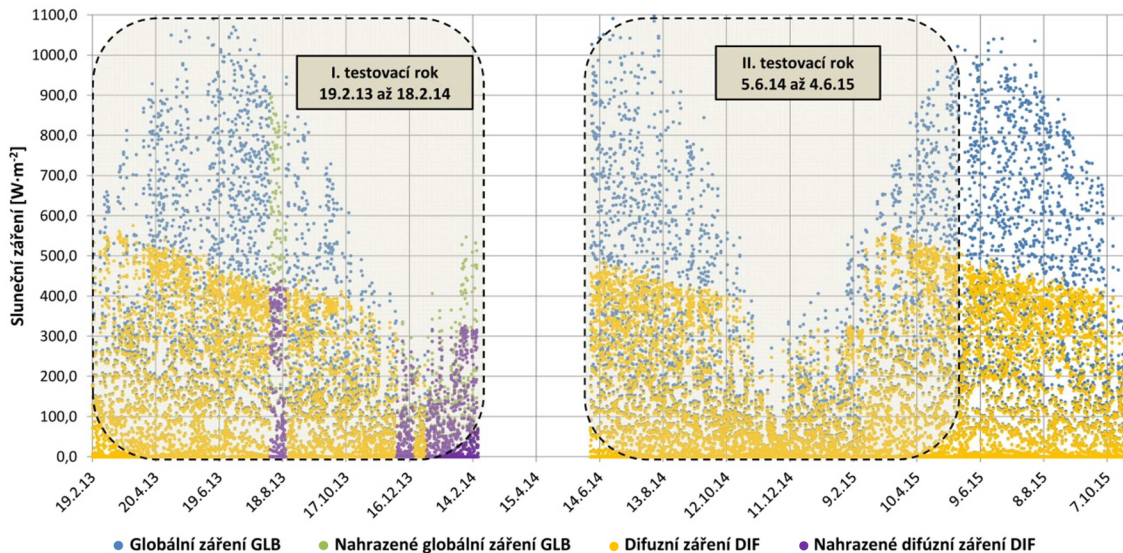


Obr. 32 - Průběh teploty, relativní vlhkosti vzduchu a rychlosti větru v exteriéru RD Rapotice

Na Obr. 32 je uveden průběh měření z dataloggerů za období 4.6 2012 až 20.5 2015. Jsou zvýrazněna časová období, která jsou použita pro I. a II. testovací rok. Rychlost větru je měřena od instalace meteostanice dne 7.4 2014.

## Globální sluneční záření

Z důvodu chyb zapříčiněných manipulací s měřicí soustavou globálního slunečního ozáření nejsou ve sledovaném období data I. testovacího roku kompletní, došlo ke 3 výpadkům. Chybějící bloky měření jsou uvedeny na Obr. 33 a Obr. 34.



Obr. 33 - Průběh měřeného globálního slunečního ozáření a vypočítaného difúzního slunečního ozáření na budově RD Rapotice, **fialovou** a **zelenou** barvou je označeno nahrazené měření

Chybějící bloky dat byly nahrazeny daty z jiného měřeného roku:

- **I. nahrazený blok 6.8 až 20.8 2013 → náhrada: 6.8 až 20.8 2015**

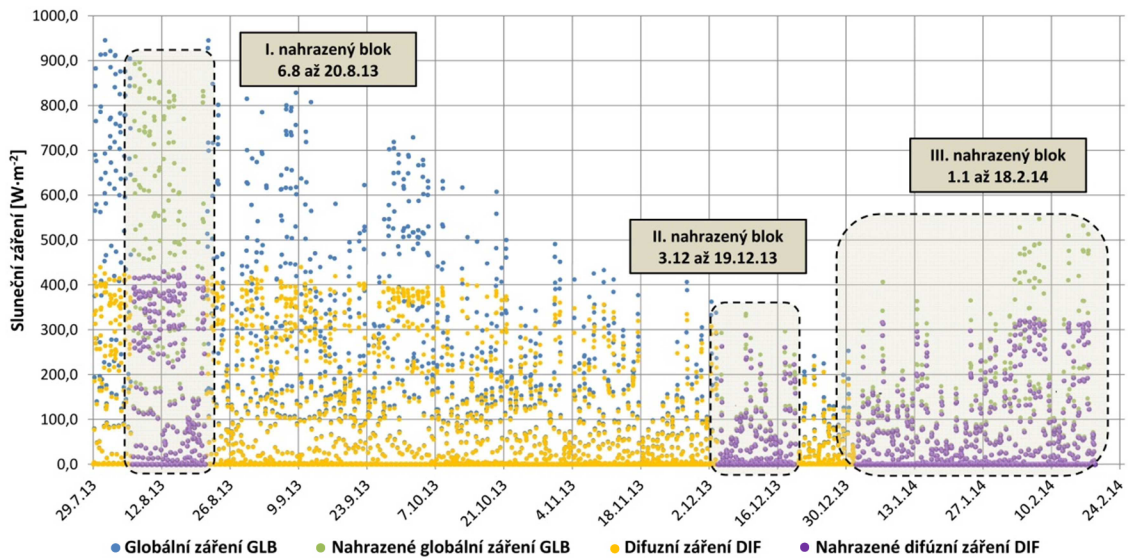
Měsíční doba trvání slunečního svitu (dále DTSS) podle Obr. 35 vychází velmi podobně. Nahrazení je tedy vyhovující v rámci kumulovaných hodnot slunečního ozáření.

- **II. nahrazený blok 3.12 až 19.12 2013 → náhrada: 3.12 až 19.12 2014**

V roce 2013 je DTSS téměř poloviční oproti roku 2014, nahrazení tedy vykazuje velkou nepřesnost. Z hlediska kumulovaných hodnot slunečního ozáření, které v zimním období vykazuje nízké hodnoty, nebude mít ale tato nepřesnost na celkový výsledek velký vliv.

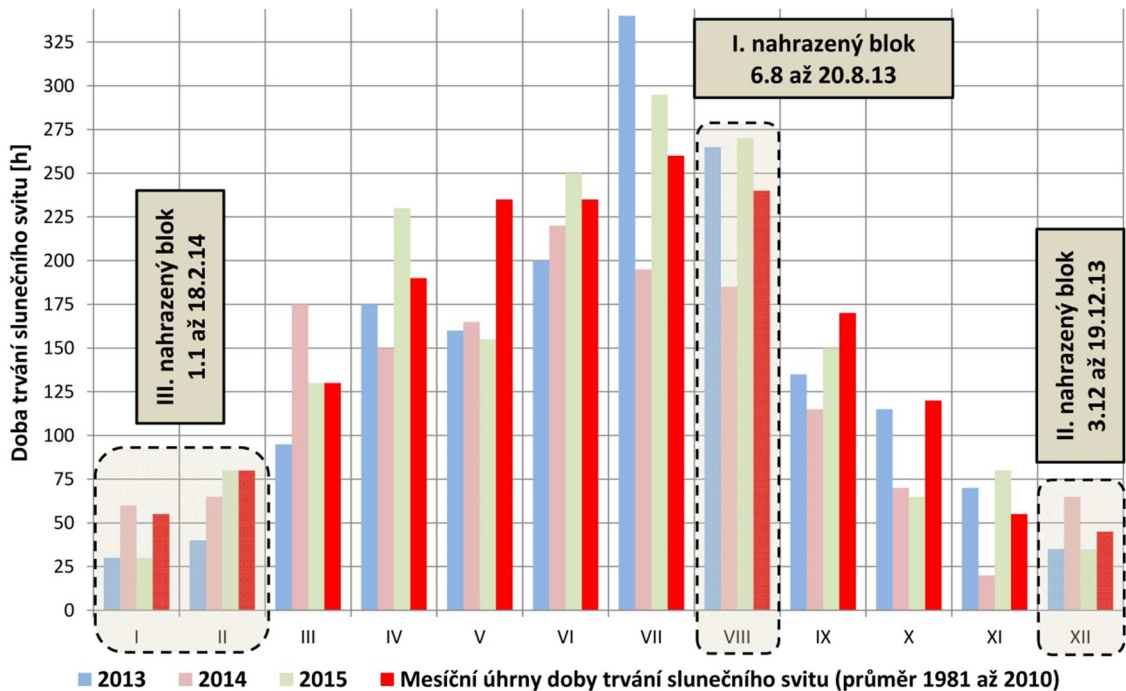
- **III. Nahrazený blok 1.1 až 18.2 2014 → náhrada: 1.1 až 18.2 2015**

DTSS v lednu jsou velmi podobné, únor již vykazuje velkou nepřesnost. Dopad na celkové výsledky bude stejný, jako v případě II. nahrazovaného bloku.



Obr. 34 - Nahrazené bloky dat slunečního záření v I. testovacím roku

Nahrazená data byla vybrána podle podobnosti délky trvání slunečního svitu nahrazovaného období vůči chybějícímu období. DTSS je jedním z klimatických parametrů, které již od počátku minulého století slouží k výpočtu globálního slunečního záření (Ångström, 1924). Protože nejsou dostupná data měření délky trvání slunečního svitu obce Rapotice, byla použita data profesionální meteorologické stanice Brno, Tuřany (id: B2BTUR01) ležící v nadmořské výšce 241 m n.m., která je vzdálená od obce Rapotice vzdušnou čarou cca 33 km.



Obr. 35 - Délky trvání slunečního svitu ve vybraných obdobích meteorologické stanice Brno, Tuřany (CHMI, 2018)

Celkem bylo nahrazeno 80 dní, tedy 21,9 % z I. testovacího roku. 65 měněných dní je ovšem ze zimního období. Při porovnání dat globálního slunečního záření z I. a II. testovacího roku, mimo dat nahrazovaných, tedy 179,1 dní bylo dosaženo hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu  $R = 0,779$ , se jedná tedy o silnou korelaci.

#### E.1.4 Model výpočtu difuzní složky globálního záření

##### Reindl model

V roce 2012 byla publikována studie, kde bylo provedeno porovnání 8 separačních modelů výpočtu difúzního záření pro oblast Vídně, které byly porovnány a statisticky vyhodnoceny. Vzdálenost obce Rapotice od Vídně je cca 110 km, obě obce leží v nadmořské výšce do 500 m n.m., použitelnost modelů je tedy pro danou obec dostatečná.

Z těchto 8 posuzovaných modelů jsou 3 - OH, ER, RE (viz Tab. 15), které vykazují v dostatečném počtu měření přiměřenou chybu. Přibližně 62 % výsledků získaných na základě těchto tří modelů vykazuje relativní chybu menší než  $\pm 20\%$  oproti reálnému měření. Výsledky odpovídají předchozím studiím, které vykazují lepší výsledky než ostatní separační modely (Dervishi, 2012).

Tab. 15 - Vstupní parametry separačních modelů (Dervishi, 2012)

#	Separační model		Rok publikace modelu	Vstupní parametry modelů
1	Orgill and Holand	OH	1977	$I, I_{ext}, \alpha$
2	Erbs	ER	1982	$I, I_{ext}, \alpha$
3	Vignola a McDaniels	VM	1984	$I, I_{ext}, \alpha$
4	Skartveit a Olseth	SO	1987	$I, I_{ext}, \alpha$
5	Maxwell	MA	1987	$I, I_{ext}, \alpha, p$
6	Reindl	RE	1990	$I, I_{ext}, \alpha, T_a, \Phi$
7	Louche	LO	1991	$I, I_{ext}, \alpha$
8	Lam a Li	LL	1996	$I, I_{ext}, \alpha$

Kde  $I$  Globální sluneční ozáření, [ $W \cdot m^{-2}$ ]  
 $I_{ext}$  Extraterestrální insolace, [ $W \cdot m^{-2}$ ]  
 $\alpha$  výška slunce nad obzorem, [ $^\circ$ ]  
 $T_a$  venkovní teplota vzduchu, [ $^\circ C$ ]

$\phi$  relativní vlhkost vzduchu, [-]

$\rho$  tlak vzduchu, [Pa]

Z výše uvedených byl pro potřeby této práce vybrán jako referenční model Reindl pro oblast Vídně, který vykazuje menší chybu, čím je větší výška slunce nad obzorem, oproti ostatním modelům ve výše zmiňované studii. Další jeho výhodou je použití většího počtu vstupních proměnných, které by měly více zohlednit lokalitu, ve které probíhalo měření. Jedná se o polynomický model, který byl vyvinut pomocí měření na 5 místech v USA a v Evropě (Reindl, 1990). V Příloze L.8 je uveden postup výpočtu.

### BRL model

Jako hlavní separační model pro tuto práci byl vybrán BRL model (Boland - Ridley - Lauret). Jedná se o model založený na logistické funkci, která obsahuje celkem 5 proměnných včetně proměnné variability. Proměnná variabilita zohledňuje určitou setrvačnost atmosféry. Zapojení více proměnných je založeno právě na výzkumu prováděném v rámci vytvoření modelu Reindl (Reindl, 1990). V příloze L.8 je uveden postup výpočtu. Model byl sestaven pomocí měření v 7 lokalitách, které jsou uvedeny v Tab. 16 (Ridley, 2010).

Tab. 16 - Referenční lokality pro vytvoření modelu BRL (Ridley, 2010)

#	Město	Stát	Zeměpisná šířka	Světladíl
1	Adelaide	Austrálie	S 34°	Austrálie
2	Darwin		S 12°	
3	Maputo	Mosambik	S 25°	Afrika
4	Brackenell	Velká Británie	N 51°	Evropa
5	Lisbon	Portugalsko	N 38°	
6	Uccle	Belgie	N 50°	
7	Macao	Macao	N 22°	Asie

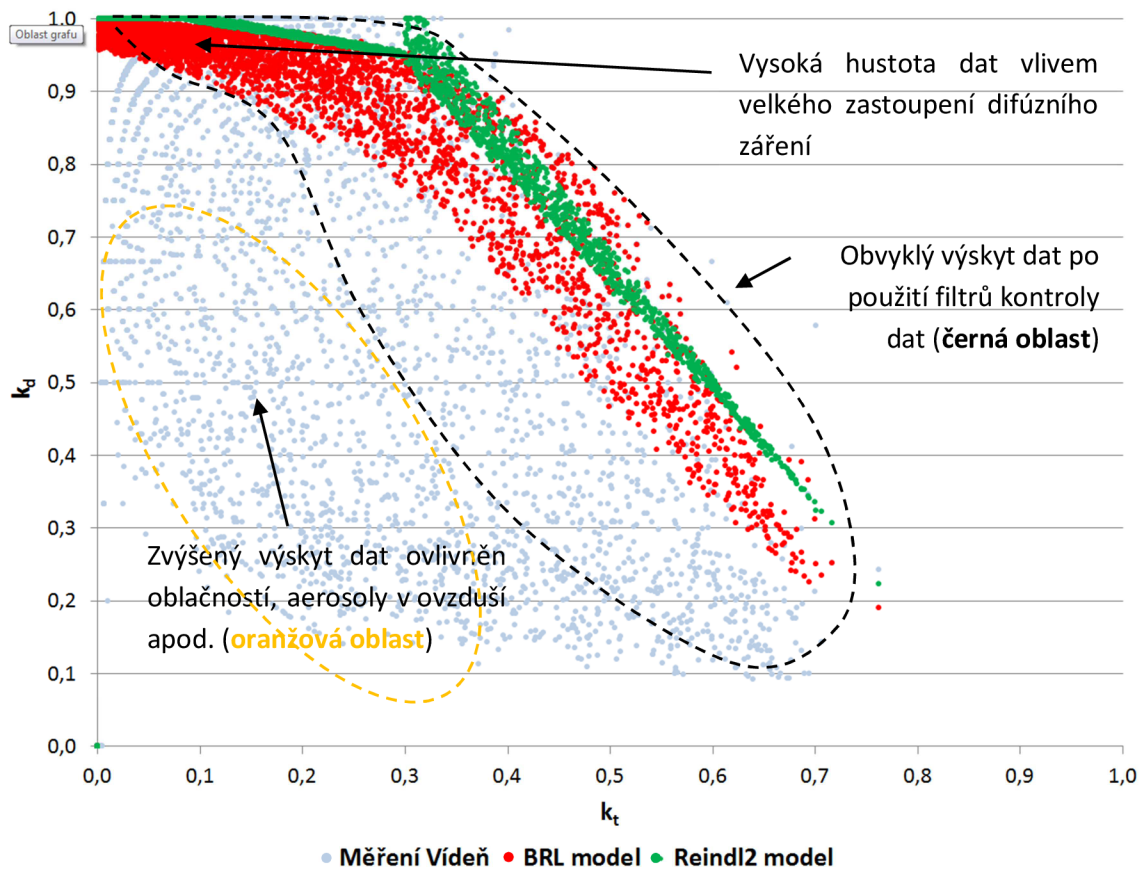
Zdroj modelu - logistická funkce (Boland, 2008) byl sestaven primárně pro jižní polokouli. Později byl ale model upraven pro všeobecné použití. Výhodou modelu BRL je, že je založen na proměnných, které se odvozují a neměří se. Je tedy méně náročný na sestavení vstupních dat.

## Porovnání separačních modelů

Pro porovnání obou modelů bylo použito celoroční měření globálního a difúzního slunečního ozáření stanice Wien - Hohe Warte z roku 2014. Stanice je v nadmořské výšce 203 m n.m. v zástavbě Vídně. Data byla získána z databáze WRDC (WRDC, 2018). Jedná se o surová data, která nebyla ošetřena žádnými filtry zohledňujícími kvalitu dat.

Nezvykle zvýšený výskyt dat v oranžové oblasti na Obr. 36 je způsoben řadou důvodů:

- na severní polokouli je pozorována vyšší úroveň stratosférických sulfátových aerosolů (Balling, 1991);
- jedná se o oblast, která je velmi ovlivněna průhlednou oblačností  $k_t \leq 0,2$  (thin overcast). Při vyšších hodnotách  $k_d$  se již ale jedná o těžkou oblačnost (Muneer, 2004);
- a v neposlední řadě se jedná o surová data, jak bylo popsáno výše.



Obr. 36 - Porovnání závislosti parametrů  $k_d$  na  $k_t$  u modelů BRL a Reindl2 s měřením ve Vídni



Na Obr. 36 po vizuální stránce model BRL vykazuje lepší rozložení hodnot než model Reindl2. Model Reindl2 není schopen dostatečně pokrýt data v oblasti vysokých parametrů hodnot  $k_t$  a nízkých hodnot  $k_d$ , kde dosahuje model BRL lepších výsledků. Jedná se o oblast s vysokým energetickým významem pro solární systémy (přímé záření).

Statistické porovnání obou modelů v Tab. 17 vůči naměřeným údajům ve Vídni ukazuje mírně lepší výsledky dosažené u modelu BRL.

Tab. 17 - Statistické parametry porovnání separačních modelů

#	Separční model	rMBD [%]	rMAD [%]	rRMSD [%]	R [-]
1	Reindl2	61,5	62,2	143,1	0,864
2	BRL	51,0	54,5	128,0	0,861

Závěrem lze tedy pro výše provedené posouzení říci, že model BRL dosahuje pro oblast Vídně mírně lepších výsledků než již dříve prověřený model Reindl. Model BRL byl použit pro výpočet dat difúzního slunečního záření, která se použijí jako vstupní údaje pro numerickou simulaci solárního termického systému v této práci.

Na Obr. 54 (Příloha L.9) je provedeno porovnání závislosti parametrů  $k_d$  na  $k_t$  u modelů BRL a Reindl1 pro obec Rapotice.

## E.2 Porovnání GLB jednotlivých klimatických roků použitých v numerických simulacích

Přestože přímé porovnání klimatických roků dle Meteorormu resp. RKR s dvouletým výběrem měřených dat nemá velký význam kvůli zdroji dat a důvodům uvedených v kapitole B.5, má porovnání těchto roků určitý hodnotný informativní charakter. Informace z daného porovnání nám umožní lépe pochopit, případně i vysvětlit výsledky a závěry numerických simulací s jednotlivými klimatickými roky.

Kombinace klimatických roků byly posouzeny pro roční resp. měsíční sumy GLB vizuálním porovnáním a dále měsíční údaje dle statistických modelů uvedených v kapitole D.4.

Roční sumy globálního ozáření uvedených v Tab. 18 poukazují na předpokládané nižší hodnoty u hlavních klimatických roků Meteororm a RKR, které odpovídají určitým průměrným hodnotám z víceletého období popsaného v kapitole B.5, a reprezentují dlouhodobý trend klimatu v dané lokalitě. Menších odchylek vůči použitým doplňkovým klimatickým rokům dosahuje Meteororm. Oproti klimatickému roku 2013/2014 resp. 2014/2015 dosahuje o 2,5 % menšího rozdílu než RKR.

Tab. 18 - Rozdíl ročních sum globálního slunečního ozáření

#	Sumy globálního ozáření [kWh·m <sup>-2</sup> ] Hlavní klimatické roky		Sumy globálního ozáření [kWh·m <sup>-2</sup> ] / Rozdíl [%] Doplňkové klimatické roky			
			Rapotice 2013 / 2014		Rapotice 2014/2015	
1	Meteororm 7.2	1127,6	1230,7	-8,4	1193,0	-5,5
2	RKR	1097,1		-10,9		-8,0
3	Rapotice 13/14	1230,7		-		+3,1
4	Rapotice 14/15	1193,0		-3,1		-

V Tab. 19 je provedeno statistické porovnání 4 kombinací klimatických roků použitých v numerických simulacích. Porovnáván je vždy 1 hlavní klimatický rok s doplňkovým klimatickým rokem měřeným přímo na posuzovaném RD.

- **Porovnání s klimatickým rokem - Rapotice 2013/2014**

Nižší hodnoty rMAD a rRMSD v letním období poukazují na lepší shodu dat slunečního ozáření posuzovaných klimatických roků než v zimním období. Naproti tomu vysoké hodnoty rRMSD v zimním období, více než dvojnásobné oproti letnímu období, poukazují na velký rozptyl dat slunečního ozáření mezi jednotlivými klimatickými roky. Potvrzuje to i korelační koeficient R, který je průměrně v letním období o cca 1/4 vyšší. Meteororm v porovnání rMAD a rRMSD vykazuje průměrně o 10 % menší odchylku než RKR.

- **Porovnání s klimatickým rokem Rapotice - 2014/2015**

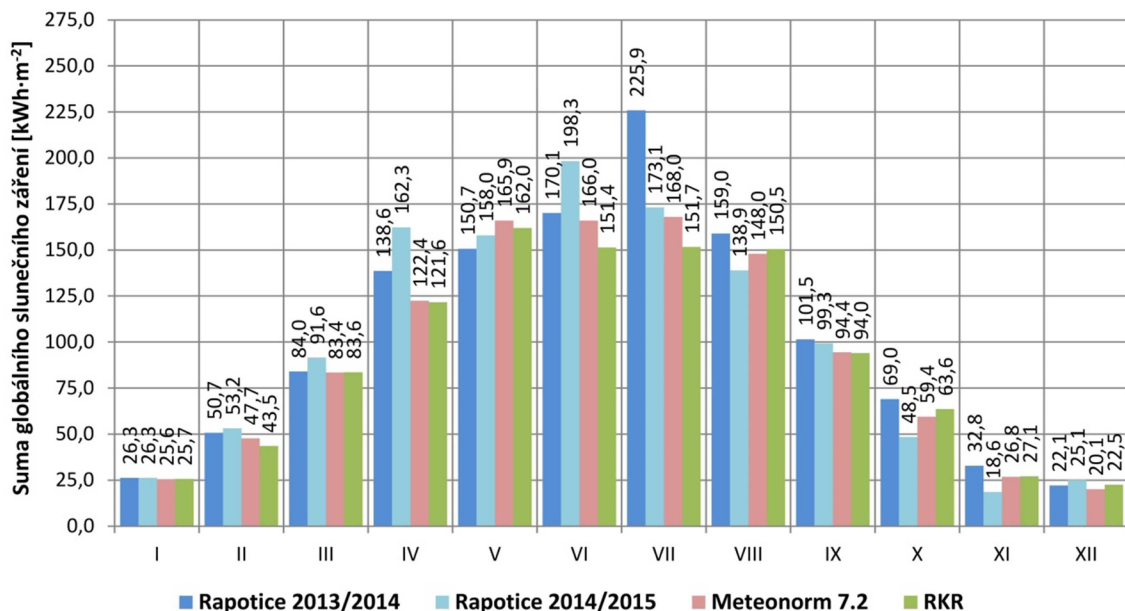
Oproti předešlému porovnání nastává velký rozdíl, hodnoty rMAD a rRMSD jsou vysoké v průběhu celého období, což poukazuje na velké rozdíly mezi daty posuzovaných klimatických roků.

Tab. 19 - Měsíční statistické porovnání dat vybraných kombinací klimatických roků

Porovnání	Statistická metoda	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Meteonorm x Rapotice 13/14	rMBD [%]	8,3	14,4	-16,6	-3,6	11,3	-13,0	-1,2	8,5	5,2	10,9	14,0	-13,0
	rMAD [%]	92,0	70,3	45,0	42,0	61,0	43,1	51,2	49,8	61,5	74,2	87,4	89,1
	rRMSD [%]	210,6	149,0	93,0	74,6	108,2	73,2	89,6	90,3	119,0	153,1	209,2	202,9
	R [-]	0,538	0,706	0,790	0,833	0,679	0,776	0,716	0,775	0,703	0,653	0,621	0,513
RKR x Rapotice 13/14	rMBD [%]	8,7	4,3	-16,4	-4,3	8,0	-21,1	-10,8	10,4	4,7	18,6	14,8	-2,5
	rMAD [%]	80,4	60,9	55,4	55,8	58,8	48,8	60,6	60,3	69,4	86,7	91,6	79,8
	rRMSD [%]	177,7	129,6	104,7	97,2	97,8	79,1	99,6	100,8	128,1	167,8	212,7	175,2
	R [-]	0,653	0,749	0,725	0,724	0,725	0,737	0,645	0,722	0,652	0,621	0,636	0,650
Meteonorm x Rapotice 14/15	rMBD [%]	54,7	87,0	88,4	79,5	150,1	125,2	110,5	112,3	85,2	74,3	74,6	42,3
	rMAD [%]	109,4	109,1	124,8	96,9	158,0	140,1	125,5	123,9	116,6	110,3	122,1	102,3
	rRMSD [%]	253,4	237,8	243,2	170,4	271,3	230,5	208,7	212,8	217,7	223,2	289,6	238,2
	R [-]	0,651	0,784	0,676	0,802	0,763	0,753	0,754	0,800	0,700	0,714	0,612	0,641
RKR x Rapotice 14/15	rMBD [%]	55,3	70,5	88,8	78,3	142,7	104,3	90,1	116,0	84,4	86,4	75,8	59,4
	rMAD [%]	106,8	98,0	116,7	106,6	158,6	121,1	121,4	130,4	113,1	130,5	133,2	115,8
	rRMSD [%]	237,4	216,5	224,1	186,5	262,1	197,7	206,4	218,8	211,1	253,9	315,6	261,3
	R [-]	0,670	0,730	0,738	0,743	0,730	0,792	0,665	0,781	0,722	0,673	0,598	0,609

Hodnoty rMBD poukazují na výraznější nadhodnocení hodnot slunečního ozáření klimatických roků Meteororm a RKR oproti měření na posuzované budově RD. Výsledky odpovídají i Obr. 35, kde jsou hodnoty DTSS po převážnou část roku menší než je dlouhodobý průměr za období 1981 až 2010. RKR vykazuje mírně větší přesnost dat než Meteororm z důvodu nižších odchylek hodnot rRMSD.

Na Obr. 37 je provedeno měsíční porovnání sum globálního slunečního ozáření jednotlivých klimatických roků. V zimním období je patrná vyšší vyrovnanost mezi jednotlivými klimatickými roky. Především hlavně klimatické roky Meteororm a RKR jsou velmi podobné. V letním období jsou již rozdíly vyšší, projevuje se zde dynamika slunečního záření jednotlivých roků.



Obr. 37 - Porovnání měsíčních sum GLB mezi jednotlivými klimatickými roky použitých pro numerickou simulaci

Přestože v zimním období je dosahováno vyšších odchylek než v letním období, mezi měsíčními hodnotami jednotlivých sum GLB jsou velmi malé rozdíly. Zimní období je tedy velmi ovlivněno dynamickým vývojem počasí, ale celkové množství slunečního ozáření se výrazně nemění.

V přechodném a letním období jsou odchylky menší, ale při vyšších hodnotách GLB se zde projevují větší rozdíly mezi celkovými sumami slunečního ozáření.

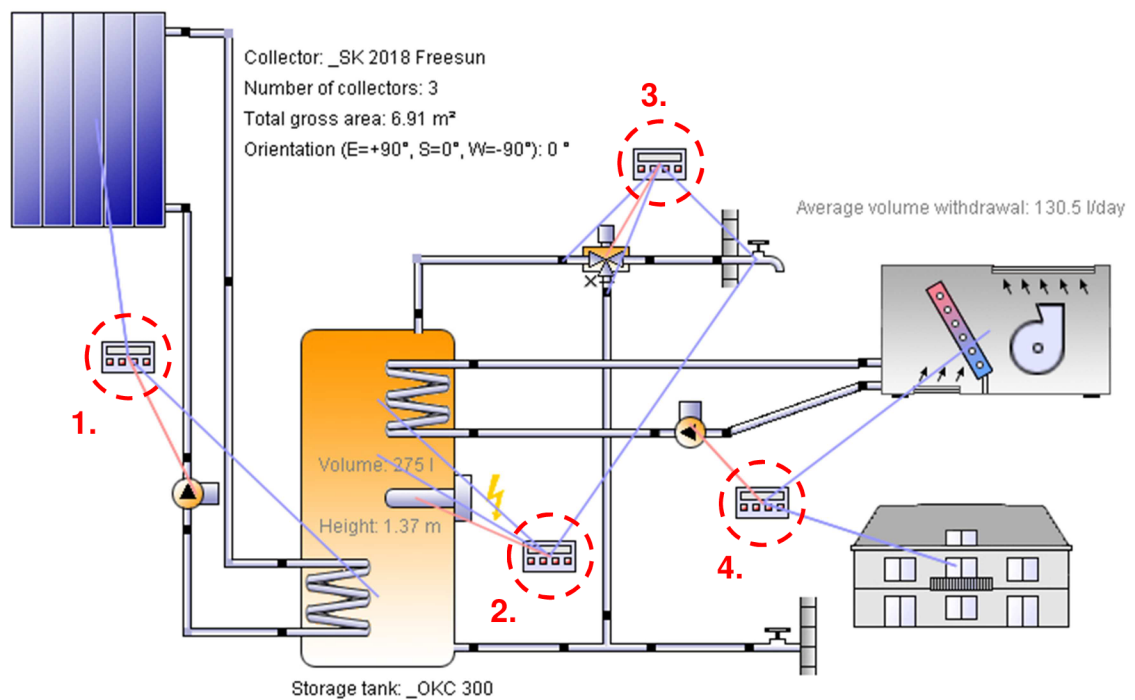
## E.3 Numerická simulace solárního termického systému pro různé okrajové podmínky

Sady klimatických dat pro numerickou simulaci jsou popsány v kapitole D.3.1.

### E.3.1 Model systému

Model systému byl vytvořen na základě technického popisu v kapitole D.1 a měřených dat popisovaných v kapitole E.1. Měřené úrovně průtoku, teplot, spotřeby TV apod. sloužily k nastavení ovládacích prvků modelu.

Na Obr. 38 je ukázka modelu s vyznačenými ovládacími prvky (regulace) a jejich řídicím napojením. Modrá čára znázorňuje vstupní údaje, růžová čára řídicí výstup. Dle geometrie a objemu solárního akumulčního zásobníku je kapalina rozdělena dle přednastaveného procentuálního rozdělení na 12 izotermických vrstev (vrstva 1 je nejnižší, vrstva 12 je nejvyšší). Software polysun uvažuje s teplotním rozvrstvením tepla v zásobníku.



Obr. 38 - Model systému v programu Polysun, ovládací prvky: modrá čára - vstupní data, růžová čára - řídicí výstup)

Popis vstupních údajů pro řízení modelu:

1. Řízení primárního okruhu (teplota na výstupu z kolektorů, maximální teploty v kolektoru a zásobníku, zapínací a vypínací teplotní rozdíl a teplota ve 2. vrstvě zásobníku)

2. Řízení topné tyče (zapínací a vypínací teplota, teplota v 7. a 9. vrstvě zásobníku)
3. Řízení směšovacího ventilu (teplota přiváděné vody ze zásobníku, teplota studené vody, požadovaná teplota teplé vody)
4. Řízení VZT okruhu (zapínací teplota vytápění, průměrná teplota exteriéru, předepsaná a aktuální teplota v interiéru, návrhový průtok čerpadlem)

Nevýhodou navrženého modelu systému je závislost VZT okruhu na teplotních podmínkách v budově, kterou není ale možné dostatečně podrobně zadat v softwaru Polysun. Klimatické údaje byly zadány formou hodinových dat ve variantách dle kapitoly D.3.1.

### E.3.2 Kontrola numerické simulace

Jak bylo popsáno v kapitole D.3.1, doplňkové sady klimatických dat ve variantě C a D slouží pro ověření kvality numerické simulace. Ta je ovlivnitelná velkým množstvím zadávaných parametrů, které v kombinaci či samostatně mají velký vliv na přesnost výsledků, které poté mohou být zavádějící.

Jako rozhodující parametr o použitelnosti a kvalitě simulace byla vybrána solární energie dodaná zásobníku Ssol s požadovanou odchylkou  $\pm 20\%$  oproti naměřeným údajům ze stavby ze stejného časového období.

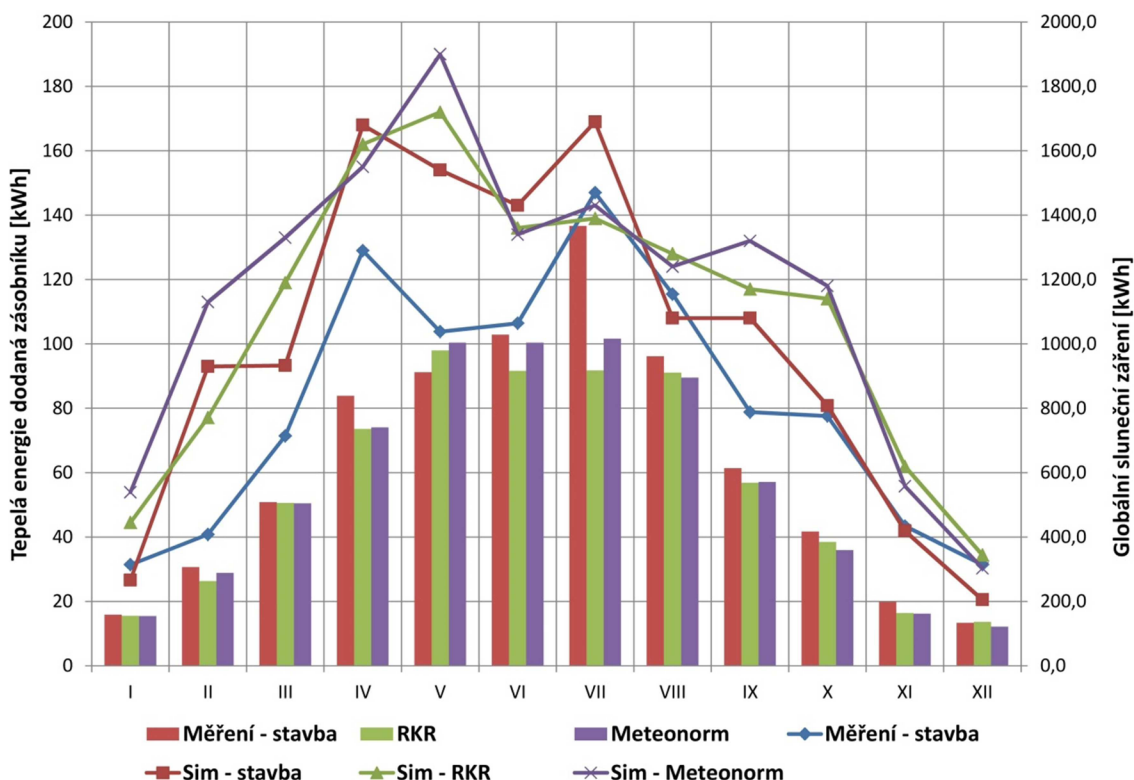
Tab. 20 - Rozdíl v dodané energii do zásobníku mezi numerickou simulací a měřenými údaji ze stavby

#	Klimatické roky		Solární energie dodané zásobníků Ssol	
			[kWh]	Odchylka [%]
1	Varianta C	Měření	976,5	+19,0
2		Simulace	1206,0	
3	Varianta D	Měření	1092,5	+19,4
4		Simulace	1356,0	

Dosažené odchylky v Tab. 18 splňují požadavky pro potřeby přesnosti modelu.

### E.3.3 Porovnání variant klimatických roků 2013/2014

Na Obr. 39 je provedeno porovnání tepelných energií dodaných zásobníku solárním termickým systémem pro jednotlivé varianty simulací a přímého měření na stavbě pomocí měřiče tepla (kalorimetru) v I. testovacím roce 2013/2014. Porovnání je doplněno o sumy globálního slunečního ozáření pro dané období a příslušné varianty simulací.

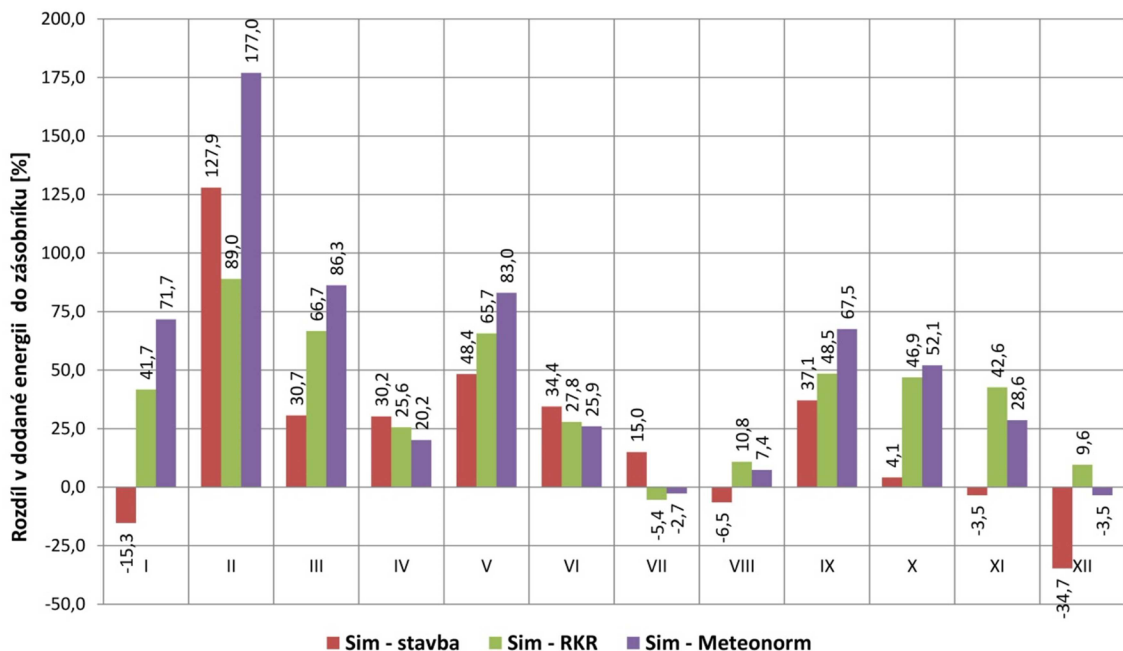


Obr. 39 - Porovnání tepelné energie dodané zásobníku pro referenční rok 2013/2014 a různé varianty simulace, **sloupcový graf** znázorňuje globální sluneční ozáření a **spojnícový** dodanou energii zásobníku termálního solárního systému

Po většinu roku vykazují všechny varianty numerických simulací větší tepelné zisky oproti měření na stavbě. Způsobeno je to především proměnlivým chováním uživatelů systémů oproti systematicky zadaným okrajovým podmínkám v numerické simulaci. V letním a zimním období jsou rozdíly relativně malé. V zimním období jsme limitováni malým množstvím slunečního záření, naopak v letním období je slunečního záření dostatek, ale systém není schopen dostupnou energii efektivně ukládat. Důvod je především v malé akumulační schopnosti posuzovaného solárního termického systému. Na Obr. 29 je v zásobníku patrná stálá vysoká teplota po celé jeho výšce, takže když se sepne čerpadlo primárního okruhu, zásobník je rychle vyhřátý na maximální

teplotu a poté dojde k vypnutí a stagnaci solárního termického systému. Na jaře a na podzim jsou rozdíly mezi jednotlivými posuzovanými variantami větší, hlavním důvodem je dynamicky se vyvíjející počasí.

Na Obr. 40 jsou uvedeny procentuální rozdíly tepelné energie dodané zásobníku mezi měřeními na stavbě, která je brána jako referenční hodnota, a jednotlivými variantami simulace pro rok 2013/2014. V měsících VI až VIII vykazuje simulace RKR a Meteororm velmi podobných výsledků, maximální rozdíl mezi těmito variantami je 3,4 %. Ve zbylých měsících ovšem varianta simulace RKR oproti Meteorormu dosahuje lepších výsledků, a to až o desítky %, a v případě, že je lepší varianta Meteororm, je rozdíl zpravidla v řádu jednotek % (kromě měsíce XI).

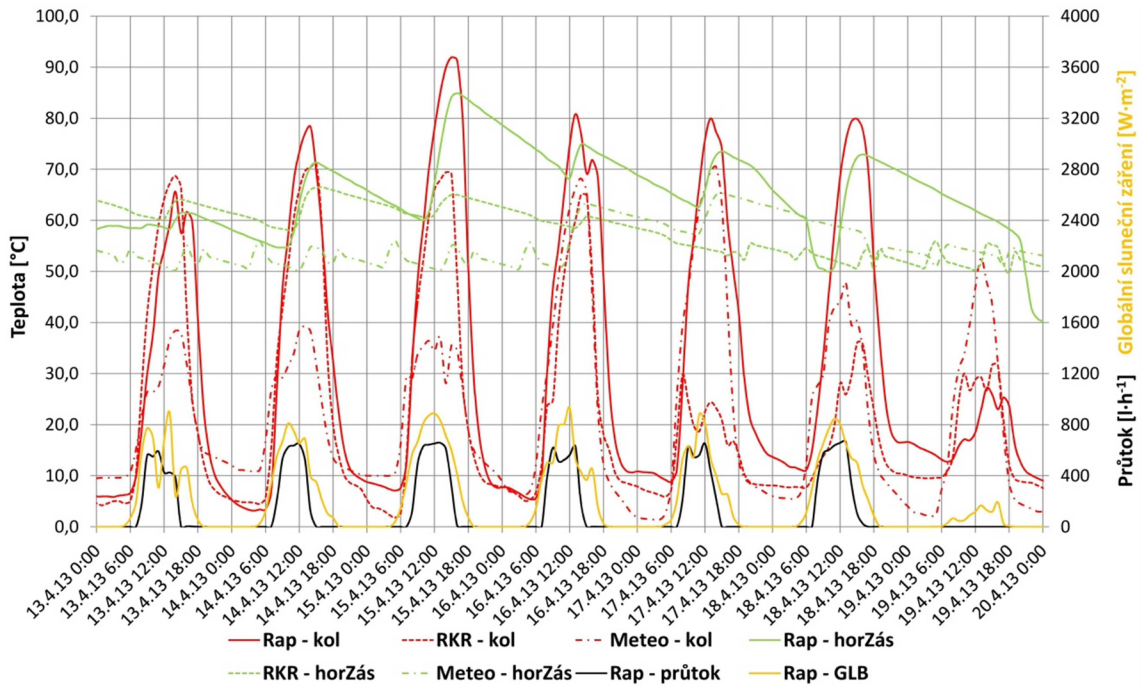


Obr. 40 - Rozdíly tepelné energie dodané zásobníku pro referenční rok 2013/2014, rozdíly jsou stanovené od měřených hodnot kalorimetrem

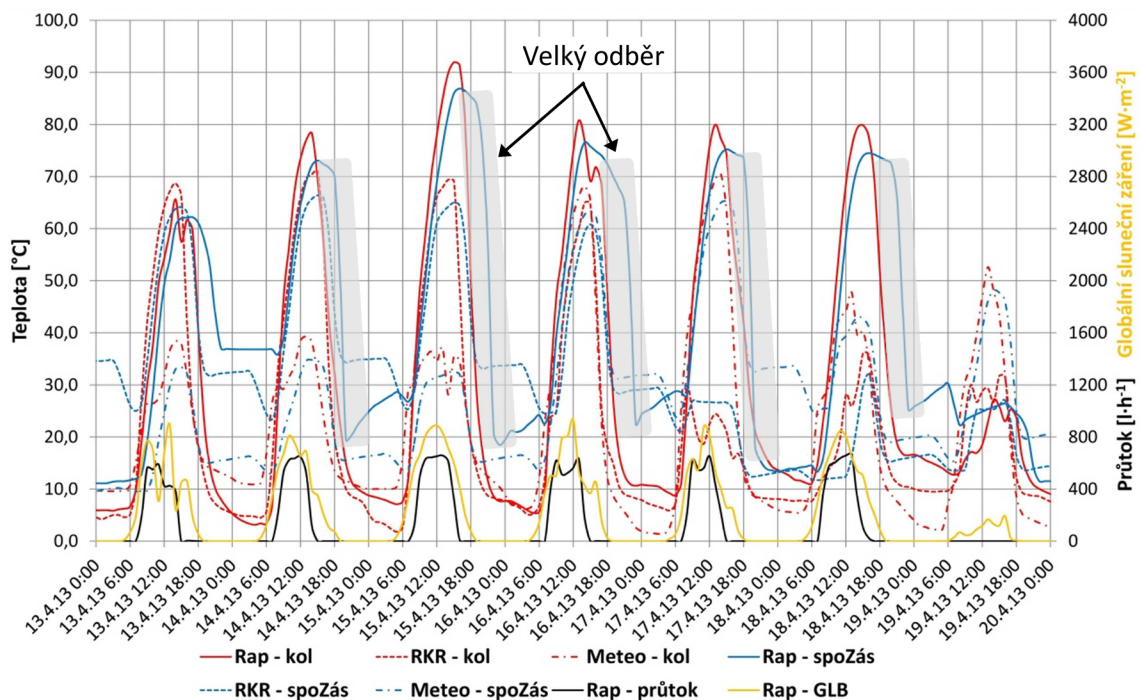
Simulace ve variantách RKR a Meteororm dle očekávání dosahují větších rozdílů oproti variantě s měřenými údaji na stavbě, ale v měsících VI až VIII jsou rozdíly poměrně malé.

Zajímavý stav nastává v měsíci IV, kdy je dosahováno vysokých tepelných zisků solárního systému, následovaném ziskovým propadem v měsíci V a VI. Na následujících Obr. 41 až Obr. 44 je provedeno porovnání přímého měření na stavbě a 2 variant simulací (RKR a Meteororm) v měsíci IV a VI.

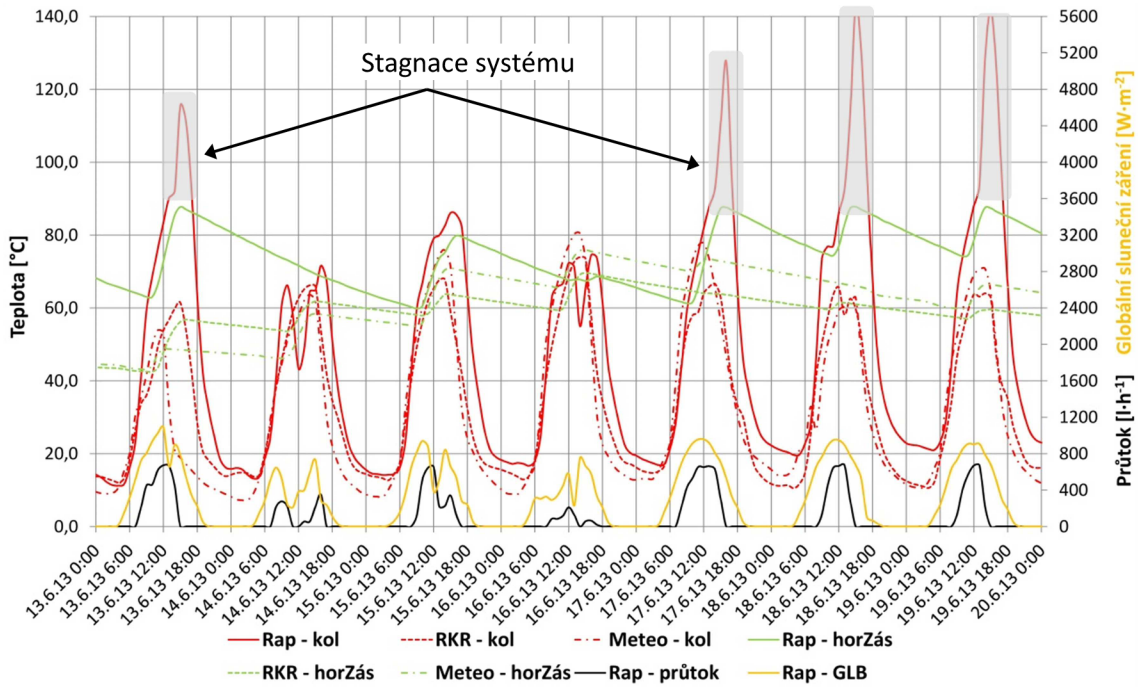




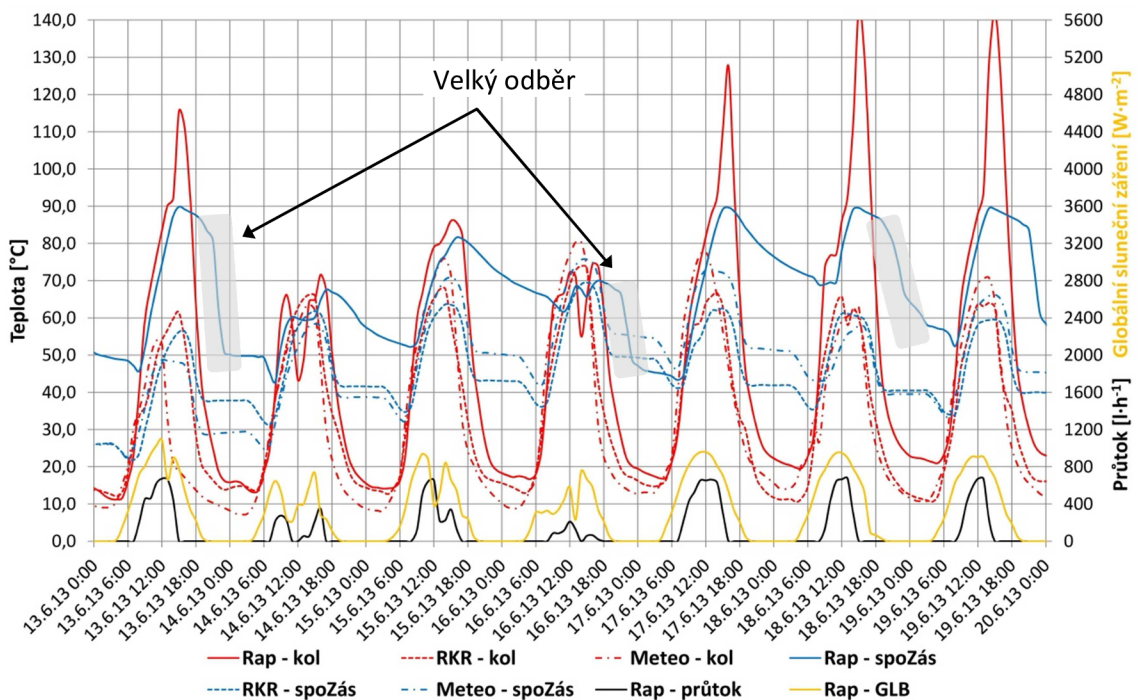
Obr. 41 - Průběh měření na stavbě (označeno Rap) a 2 variant simulace solárního termického systému (varianta RKR a Meteonorm) v období od 13.4 do 20.4 2013. Porovnává se teplota na výstupu z kolektoru (označení „kol“) a v horní části zásobníku (označení „horZás“)



Obr. 42 - Průběh měření na stavbě (označeno Rap) a 2 variant simulace solárního termického systému (varianta RKR a Meteonorm) v období od 13.4 do 20.4 2013. Porovnává se teplota na výstupu z kolektoru (označení „kol“) a ve spodní části zásobníku (označení „spoZás“)



Obr. 43 - Průběh měření na stavbě (označeno Rap) a 2 variant simulace solárního termického systému (varianta RKR a Meteonorm) v období od 13.6 do 20.6 2013. Porovnává se teplota na výstupu z kolektoru (označení „kol“) a v horní části zásobníku (označení „horZás“)



Obr. 44 - Průběh měření na stavbě (označeno Rap) a 2 variant simulace solárního termického systému (varianta RKR a Meteonorm) v období od 13.6 do 20.6 2013. Porovnává se teplota na výstupu z kolektoru (označení „kol“) a ve spodní části zásobníku (označení „spoZás“)

Zásadním rozdílem mezi měsícem IV a VI, který má vliv na celkový chod solárního termického systému, je spotřeba TV. V měsíci IV byl odběr o 34 % větší, jak je patrné z Tab. 12. Měsíc IV kvůli větší spotřebě TV vykazuje nižší teploty ve spodní části zásobníku v rozmezí 20 až 30°C kvůli přítoku většího množství studené vody. To ale vyhovuje solárnímu termickému systému, který se tak může spínat častěji, protože je dosaženo spínacího teplotního rozdílu mezi spodní částí zásobníku a výstupní teplotou kolektoru. K velkým odběrům TV dochází především ve večerních hodinách po 18 hodině.

Měsíc VI vykazuje nižší spotřebu TV. Oproti měsíci IV dosahuje teplota v horní části zásobníku průměrně o 10°C vyšších hodnot. To způsobuje nižší spotřebu vlivem menšího odběru TV ze zásobníku, ale větší spotřebu studené vody u trojcestného ventilu, aby byla dosažena požadovaná teplota vody u výtokových baterií. Výsledkem je průměrná teplota ve spodní části zásobníku v rozmezí 55 až 65 °C, která ovšem způsobí rychlé přehřátí zásobníku, protože teplo ze solárního termického systému se nemá kde akumulovat a nastává stagnace systému.

Porovnání simulací RKR a Meteonormu s měřením na stavbě v takto krátkých časových obdobích 1 týdne je zavádějící. Zde je uvedeno kvůli vysvětlení co se děje v měsících IV a VI. Dlouhodobé statistické porovnání je provedeno v kapitole E.4.

Měsíční účinnost solárního termického systému je definována podílem výše porovnávaných parametrů v rovnici R.17.

$$\eta = \frac{S_{sol}}{E_{sol}} \quad \text{R.17}$$

Kde	$\eta$	účinnost solárního termického systému, [%]
	$S_{sol}$	dodaná energie zásobníku (započítaná účinnost kolektoru a tepelné ztráty rozvodů primárního okruhu), [kWh]
	$E_{sol}$	sluneční ozáření na plochu absorberu kolektorů, [kWh]

Tab. 21 - Měsíční hodnoty účinnosti solárního termického systému pro období 2013/2014

Účinnost solárního termického systému													
Var	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Ø
A	13,9	9,5	12,8	14,9	11,9	11,2	11,1	13,2	11,4	14,7	15,6	16,2	12,5
B	11,8	21,6	16,7	19,4	17,7	15,1	12,8	12,3	15,6	15,3	15,1	10,6	15,5
C	16,2	21,1	18,2	20,5	18,4	16,3	16,2	13,1	17,0	19,1	21,1	13,2	17,3
D	16,8	23,8	19,2	19,4	19,7	14,7	15,2	17,5	23,2	41,8	21,3	11,6	17,6

Vysvětlivky: A - Měření na stavbě, B - simulace stavba. C - simulace RKR, D - simulace Meteonorm, Ø - celoroční průměr

Jak je patrné v Tab. 21, účinnost posuzovaného solárního termického systému je malá. Má to 2 hlavní důvody:

- nedostatečná velikost akumulčního zásobníku, který se rychle přehřeje a následně dochází ke stagnaci solárního termického systému;
- odběr TV především v ranních a večerních hodinách, takže není zajištěn pravidelný odběr v průběhu celého dne, který by umožňoval pravidelný chod solárního termického systému a dobíjení zásobníku.

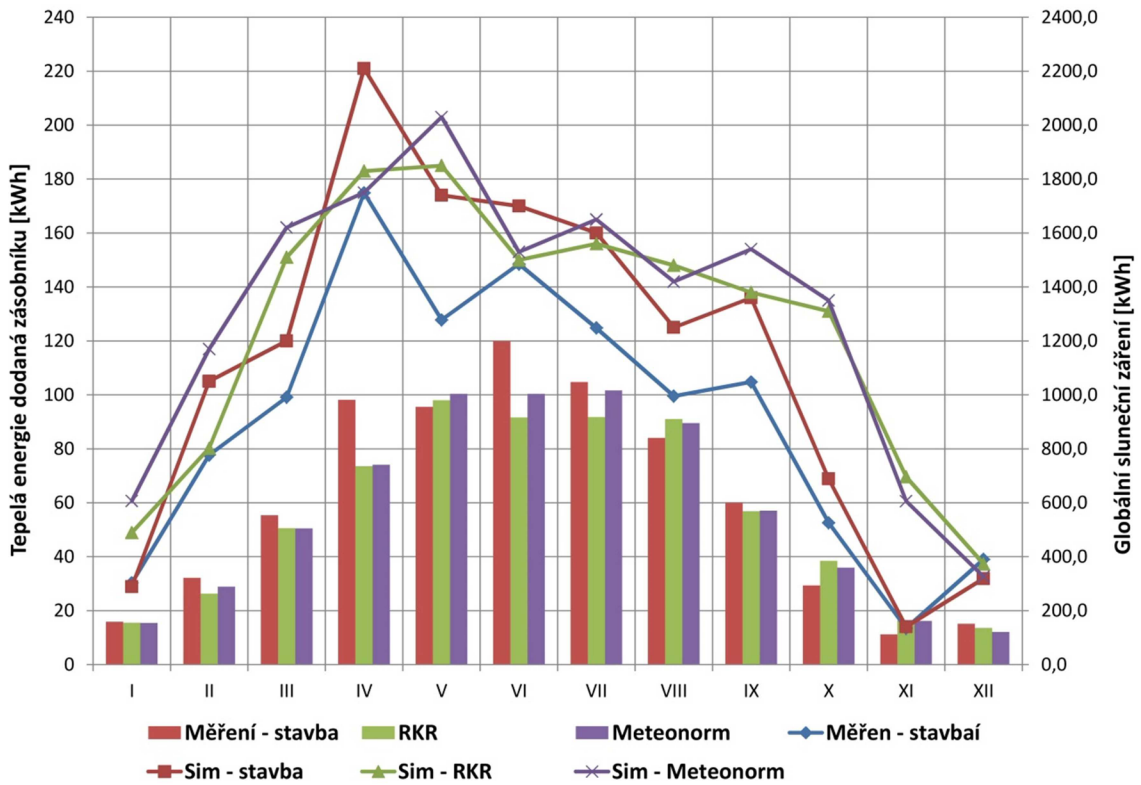
### E.3.4 Porovnání variant klimatických roků 2014/2015

Rozdíly v zadání jednotlivých variant simulací oproti předešlému sledovanému období byly především tyto:

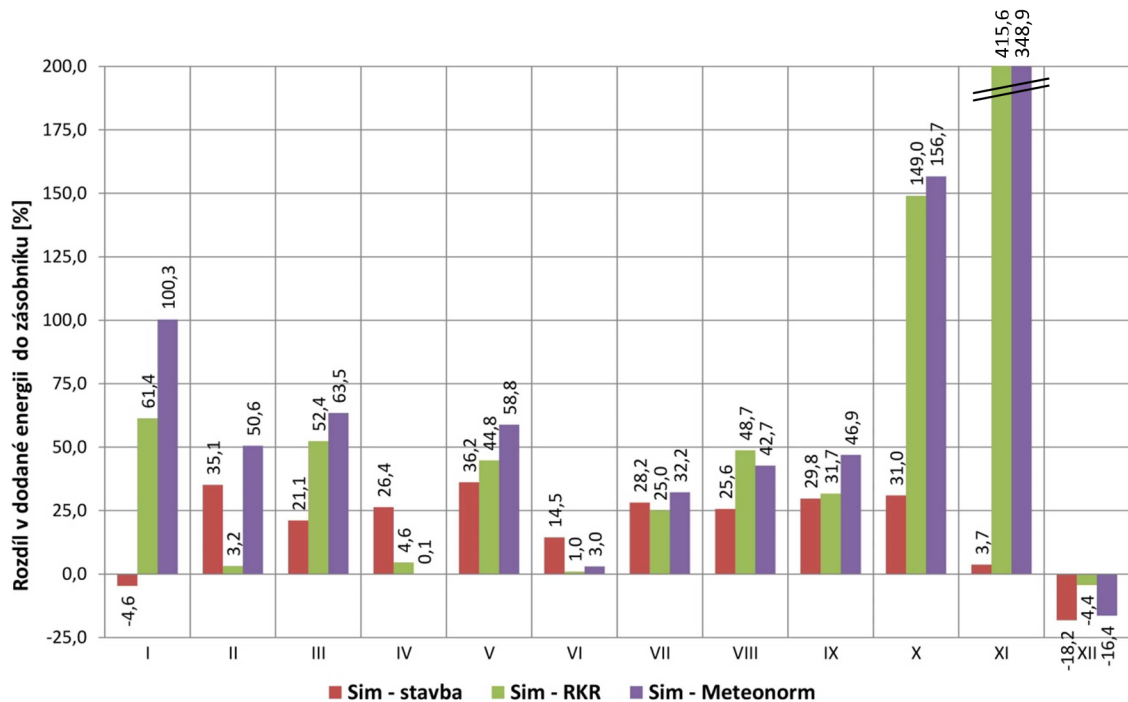
- změna klimatických dat u varianty simulace podle měření na stavbě (Sim - stavba);
- zvýšení spotřeby TV (ovlivněno narozením dalšího potomka);
- změna dlouhodobé nepřítomnosti uživatelů v budově vlivem dovolených apod.;
- změna doby zapnutí elektrické topné tyče uživatelem v topné sezóně;
- změna teploty vnitřního prostředí.

Na Obr. 45 je provedeno porovnání tepelných energií dodaných zásobníku ve II. testovacím roce 2014/2015. Vlivem větší spotřeby TV vykazují rozdíly porovnávaných simulací (Obr. 46) oproti měření na stavbě v průměru rozdíly

do 50 %. V letním období jsou již větší rozdíly než v minulém období. Vyjimkou jsou měsíce X a XI kde je velký rozdíl způsoben odlišnými slunečními poměry.



Obr. 45 - Porovnání tepelné energie dodané zásobníku pro referenční rok 2014/2015 a různé varianty simulace, sloupcový graf znázorňuje globální sluneční ozáření a spojnicový dodanou energii zásobníku termálního solárního systému



Obr. 46 - Rozdíly tepelné energie dodané zásobníku pro referenční rok 2014/2015

Simulace RKR vykazuje dle procentuálních rozdílů (Obr. 46) větší shodu s měřeními na stavbě, než varianta Meteonormu. Rozdíl není zpravidla významným (v řádu 10 %), ale prokazuje to větší vhodnost klimatických dat RKR pro naše území v případě, když není k dispozici přímé měření dané lokality.

Větší spotřeba TV nám umožňuje využít větší potenciál solárního termického systému v akumulaci tepelné energie a tedy zvýšit svojí účinnost, jak je patrné z Tab. 22, kde se zvýšila průměrná celoroční účinnost o cca 2 % u všech posuzovaných variant oproti I. testovacímu roku. V letním období je účinnost nižší než v přechodných obdobích a to z důvodů, které jsou popsány v minulé kapitole.

Tab. 22 - Měsíční hodnoty účinnosti solárního termického systému pro období 2014/2015

Účinnost solárního termického systému													
Var	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Ø
A	13,3	17,0	16,0	17,1	14,2	13,8	13,0	12,2	15,5	14,5	9,7	16,5	14,6
B	12,7	22,9	19,7	21,7	19,3	15,8	16,7	15,3	20,1	19,0	10,1	13,5	18,1
C	17,8	21,9	23,1	23,2	19,8	18,0	18,1	15,1	20,0	21,9	23,8	14,3	19,6
D	19,0	24,6	23,3	21,9	21,1	16,8	17,5	15,1	21,8	23,7	21,5	12,4	19,8

Vysvětlivky: A - Měření na stavbě, B - simulace stavba. C - simulace RKR, D - simulace Meteonorm, Ø - celoroční průměr

#### E.4 Statistické porovnání měření a numerických simulací solárního termického systému

Aby bylo možné zhodnotit, který zdroj klimatických dat je vhodnější pro návrh solárního termického systému, je provedeno statistické porovnání dat RKR dle ČSN EN ISO 15927-4 a Meteonormu s daty systému měřených na stavbě. Porovnání je provedeno pomocí 3 vybraných ukazatelů:

- teplota kolektoru na výstupu [°C];
- teplota v horní části zásobníku [°C];
- teplota ve spodní části zásobníku [°C].

Vybrané ukazatele jsou porovnány pomocí 4 statistických metod uvedených v kapitole D.4. V případě porovnání údajů z krátkých časových úseků hrozí, že vlivem dynamicky se vyvíjejícího počasí budou posuzované ukazatele silně ovlivěny krátkodobými změnami. Z toho důvodu je porovnání provedeno pro měsíční a roční časové období, aby se posuzovaly dlouhodobější průměry. Přestože celé měření předmětného solárního termického systému bylo delší (4.6 2012 až 28.7 2015), je provedeno porovnání pouze pro I. a II. testovací rok 2013/2014 resp. 2014/2015, pro které jsou zpracovány numerické simulace s vlivem uživatelů.

#### E.4.1 Roční statistické porovnání

Tab. 23 ukazuje výsledky výše popsaného statistického porovnání testovacích roků s měřením solárního termického systému na stavbě. Hodnota rMBD popisující systematickou odchylku ve všech posuzovaných variantách vychází záporná, tedy podhodnocuje výsledky, tzn. odhadovaná veličina je menší než měřená. Nejvyšší přesnosti je dle předpokladů dosaženo v horní části zásobníku, kdy v chladnějších obdobích roku je teplota udržována pomocí elektrického topného zdroje na požadované teplotě a výkyvy vlivem solárního termického systému jsou malé. V teplejší části roku je dle výše popisovaných nedostatků v kapitole E.3 v zásobníku udržována stálá vysoká teplota.

Tab. 23 - Roční statistické porovnání datových sad vybraných parametrů

Ukazatel	Separáční model	rMBD [%]	rMAD [%]	rRMSD [%]	R [-]
Teplota kolektoru na výstupu	RKR x Rap. 13/14	-16,9	49,4	78,7	0,751
	Meteo. x Rap. 13/14	-15,4	56,7	86,5	0,691
	RKR x Rap. 14/15	-14,4	49,5	77,7	0,721
	Meteo. x Rap. 14/15	-13,1	52,5	80,3	0,701
Teplota ve spodní části zásobníku	RKR x Rap. 13/14	-22,0	41,1	52,6	0,583
	Meteo. x Rap. 13/14	-20,9	43,8	55,2	0,513
	RKR x Rap. 14/15	-21,9	43,5	58,2	0,504
	Meteo. x Rap. 14/15	-20,7	43,2	57,4	0,505
Teplota v horní části zásobníku	RKR x Rap. 13/14	-7,7	13,2	18,0	0,380
	Meteo. x Rap. 13/14	-7,5	13,2	18,0	0,320
	RKR x Rap. 14/15	-10,5	16,6	19,2	0,092
	Meteo. x Rap. 14/15	-10,7	15,9	18,5	0,162

Naopak ve spodní části dosahuje systém podle různých proměných, jako je odběr TV a chod solárního termického systému, největších odchylek. Ve všech posuzovaných variantách rMBD dosahuje Meteororm o 0,2 až 1,5 % menších odchylek než RKR. Hodnoty rMAD, tedy průměrné odchylky, dosahují větších hodnot, protože jsou v absolutní hodnotě. Rozdíly mezi Meteorormem a RKR jsou již větší, rozsah odchylek od 0 do 7,3 % je ve většině případů ve prospěch RKR.

Statistický nástroj směrodatné odchylky rRMSD slouží pro hodnocení nesystematických chyb, tedy výrazných odlehlých bodů v měření či simulaci. Dle výsledků rRMSD vykazuje Meteororm ve většině posuzovaných variant vyšších odchylek než RKR, a to hlavně v případě teploty kolektoru. Rozsah odchylek je od 0 do 7,8 %. Pearsonův korelační koeficient R (dále jen PKK R) popisuje vzájemný vztah mezi 2 veličinami. Překvapivě je u ukazatele teploty v horní části zásobníku dosahováno velmi nízkých hodnot parametru R, tedy slabé závislosti posuzovaných veličin. Je to z důvodu, že v určitých obdobích roku bylo elektrické dotápění zásobníku uživatelem vypnuto a nastal velký teplotní rozdíl mezi měřenými daty a simulacemi. Naopak v případě teploty kolektoru jsou hodnoty R poměrně vysoké, protože u kolektoru je dosahováno prakticky pouze 2 stavů. Za prvé, že teplota je blízká okolnímu prostředí v případě, že solární termický systém není v chodu (vyjímka je stagnace systému). Za druhé, že teplota závisí na slunečním záření, kde v případě našich variant nejsou rozdíly moc velké, viz kapitola E.2. Závěrem lze konstatovat, že v případě ročního statistického porovnání nejsou rozdíly mezi I. a II. testovacím rokem významné a mírně lepších výsledků dosahovala varianta s klimatickými daty RKR.

#### **E.4.2 Měsíční statistické porovnání**

V následující Tab. 24, Tab. 25 a Tab. 26 je uvedeno měsíční statistické posouzení 3 vybraných ukazatelů (úvod kapitoly E.4). Každá tabulka, která se věnuje 1 ukazateli je rozdělena na 4 části, kde je provedeno posouzení mezi variantami RKR a Meteororm pro sledované období 2013/2014 resp. 2014/2015. Každá část pak obsahuje měsíční posouzení 4 statistických metod po jednotlivých měsících.



Tab. 24 - Měsíční statistické porovnání dat teploty kolektoru na výstupu

Porovnání	Statistická metoda	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
RKR x Rapotice 13/14	rMBD [%]	-41,6	8,3	15,9	-15,9	-11,1	-15,8	-33,4	-16,5	-12,3	-12,7	-23,0	-33,4
	rMAD [%]	190,6	91,0	80,4	44,7	37,1	34,2	36,4	34,3	39,4	50,5	83,8	156,5
	rRMSD [%]	284,4	155,2	122,6	71,4	56,1	50,1	56,3	54,8	60,2	78,6	135,7	262,0
	R [-]	0,366	0,649	0,705	0,721	0,713	0,771	0,761	0,746	0,725	0,651	0,512	0,413
Meteonorm x Rapotice 13/14	rMBD [%]	-15,2	17,9	21,6	-18,6	-8,6	-13,6	-31,9	-19,1	-11,4	-14,6	-18,4	-23,0
	rMAD [%]	236,2	123,8	114,5	54,7	42,5	40,1	36,6	38,0	44,2	53,2	87,4	163,2
	rRMSD [%]	359,3	191,4	165,9	76,6	60,5	59,8	53,7	58,7	67,6	80,6	145,1	267,1
	R [-]	0,153	0,572	0,512	0,676	0,654	0,631	0,797	0,706	0,639	0,620	0,423	0,429
RKR x Rapotice 14/15	rMBD [%]	-37,4	-12,9	-21,9	-24,8	-10,8	-23,7	-20,4	8,9	-15,4	6,5	-5,4	-38,9
	rMAD [%]	158,5	83,9	58,2	42,4	34,0	34,5	32,8	34,6	47,1	64,1	88,2	149,6
	rRMSD [%]	254,6	140,2	91,1	62,7	51,5	54,4	50,7	53,5	73,5	97,6	140,1	228,9
	R [-]	0,433	0,618	0,706	0,804	0,765	0,694	0,694	0,730	0,571	0,534	0,558	0,450
Meteonorm x Rapotice 14/15	rMBD [%]	-13,3	-5,0	-18,1	-27,2	-8,6	-22,0	-18,8	5,3	-14,9	3,7	0,1	-30,6
	rMAD [%]	185,4	100,8	77,2	47,4	35,1	35,9	29,1	33,6	43,7	63,4	100,8	162,1
	rRMSD [%]	301,6	154,6	118,7	65,9	53,0	53,1	42,7	51,0	66,7	97,5	165,7	248,6
	R [-]	0,343	0,598	0,508	0,784	0,744	0,704	0,800	0,737	0,646	0,492	0,290	0,376

Tab. 25 - Měsíční statistické porovnání dat teploty ve **spodní části zásobníku**

Porovnání	Statistická metoda	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
RKR x Rapotice 13/14	rMBD [%]	-38,0	-39,5	-2,1	-18,7	-22,9	-23,7	-34,4	-2,4	-18,5	-16,0	-26,3	-45,2
	rMAD [%]	64,1	59,0	56,4	46,0	39,5	32,7	36,9	32,5	34,9	36,9	40,9	51,1
	rRMSD [%]	81,2	77,2	71,4	61,3	49,3	39,4	43,5	38,5	43,1	46,1	57,4	74,4
	R [-]	0,043	0,279	0,199	0,421	0,320	0,527	0,174	-0,20	0,358	0,303	0,366	0,088
Meteonorm x Rapotice 13/14	rMBD [%]	-33,7	-23,4	9,7	-20,6	-24,9	-14,2	-33,9	-9,0	-17,0	-21,7	-27,3	-44,8
	rMAD [%]	73,8	55,7	74,1	48,4	44,5	33,1	35,2	33,2	38,6	39,5	44,1	48,9
	rRMSD [%]	89,9	74,2	87,2	62,0	54,2	40,1	40,1	39,6	46,3	51,8	61,8	71,5
	R [-]	-0,03	0,300	-0,08	0,403	0,175	0,306	0,361	-0,02	0,086	0,115	0,226	0,305
RKR x Rapotice 14/15	rMBD [%]	-32,6	-47,1	-27,4	-41,4	-18,2	-28,3	-28,1	13,0	-20,3	0,1	4,7	-52,1
	rMAD [%]	49,3	61,0	47,8	45,3	38,0	39,7	40,7	32,2	51,4	43,0	34,1	54,5
	rRMSD [%]	67,0	85,6	61,6	56,8	47,7	50,9	50,7	40,3	60,5	55,6	54,0	79,1
	R [-]	0,293	0,208	0,444	0,556	0,447	0,147	-0,10	0,162	-0,02	0,208	0,421	0,045
Meteonorm x Rapotice 14/15	rMBD [%]	-32,2	-32,8	-18,7	-41,7	-19,6	-18,9	-26,9	5,5	-18,5	-6,7	2,6	-51,7
	rMAD [%]	47,5	58,7	67,0	49,7	39,2	35,3	33,7	30,0	42,1	44,0	39,8	56,6
	rRMSD [%]	67,1	79,9	80,1	60,5	51,3	44,0	42,1	37,6	53,2	59,2	64,2	80,9
	R [-]	0,278	0,265	-0,01	0,407	0,362	0,281	0,294	0,288	0,152	0,050	0,136	0,017

Tab. 26 - Měsíční statistické porovnání dat teploty v horní části zásobníku

Porovnání	Statistická metoda	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
RKR x Rapotice 13/14	rMBD [%]	-11,0	-6,6	-1,4	-5,6	-4,0	-18,1	-19,6	-0,1	-3,0	-5,4	-7,1	-7,4
	rMAD [%]	11,8	8,4	6,7	15,7	13,1	19,8	21,1	14,1	15,4	12,0	7,7	8,1
	rRMSD [%]	12,9	10,4	10,6	20,9	16,9	24,6	26,1	17,2	19,9	14,1	8,9	9,4
	R [-]	-0,03	-0,14	0,314	0,060	0,267	0,384	-0,03	-0,27	-0,04	0,300	0,162	0,124
Meteonorm x Rapotice 13/14	rMBD [%]	-10,5	-5,3	3,9	-7,5	-5,7	-8,1	-19,7	-4,4	-5,3	-8,7	-7,0	-7,9
	rMAD [%]	11,3	8,6	12,5	16,2	15,8	17,0	19,7	14,5	15,5	13,5	7,9	8,5
	rRMSD [%]	12,5	10,8	17,5	21,0	19,9	20,5	22,9	18,4	20,0	17,5	9,0	9,9
	R [-]	0,072	-0,20	-0,26	0,079	-0,09	0,170	0,170	-0,05	-0,15	-0,02	0,390	0,082
RKR x Rapotice 14/15	rMBD [%]	-14,1	-18,2	-16,7	-17,5	-6,6	-15,4	-8,0	11,7	-8,0	-5,5	-15,2	-13,7
	rMAD [%]	14,6	18,7	20,2	17,6	12,7	18,9	17,3	18,4	17,2	12,6	15,8	14,3
	rRMSD [%]	15,4	20,4	21,7	20,3	15,3	23,6	21,2	21,0	20,9	14,3	16,5	14,8
	R [-]	0,183	0,161	0,249	0,314	0,358	-0,52	-0,37	-0,28	-0,08	0,020	0,109	0,178
Meteonorm x Rapotice 14/15	rMBD [%]	-14,3	-16,8	-12,0	-18,8	-8,3	-9,2	-9,8	6,5	-9,6	-8,9	-15,1	-13,7
	rMAD [%]	14,8	17,2	17,0	19,4	13,8	18,6	14,4	14,7	15,7	14,1	16,1	14,3
	rRMSD [%]	15,6	19,4	20,0	21,5	17,4	22,2	17,8	17,5	19,6	15,5	16,9	14,9
	R [-]	0,104	0,221	0,094	0,215	0,111	-0,36	0,106	0,167	-0,02	-0,15	-0,02	0,165

- **Teplota kolektoru na výstupu (Tab. 24)**

Varianty RKR a Meteorom v průběhu roku dosahují střídavých nižších odchylek rMBD v maximálním rozdílu do 10 %. Vyjímkou je měsíc leden, kde jsou odchylky maximálně 26,4 %. Odchylky rMAD a rRMSD předešlé porovnání ale vyvracejí, naopak v řádu až desítek % dosahuje varianta RKR menších odchylek. Obě statistické metody více zohledňují kumulativní velikost odchylek než metoda rMBD, která je ovlivnitelná podhodnocujícími či nadhodnocujícími daty. Uvedené závěry také podporují hodnoty PKK R, které kromě 2 měsíců v období 13/14 resp. 4 měsíců v období 14/15 vychází ve prospěch varianty RKR. Průměrně tvoří rozdíl 1 desetina R.

- **Teplota ve spodní části zásobníku (Tab. 25)**

Statistické výpočty byly v tomto posouzení silně ovlivněny proměnlivou spotřebou vody uživateli objektu, která způsobuje výkyvy teploty ve spodní části zásobníku. PKK R z těchto důvodů vykazuje velké rozdíly mezi jednotlivými měsíci i variantami posouzení. V několika případech dosahuje i záporných hodnot, které dokládají velký rozptyl vstupních dat. Parametry rMAD a rRMSD vykazují v průběhu celého roku podobných výsledků, není zde dosahováno velkých rozdílů mezi zimním a letním obdobím. Rozdíly jsou v řádu desítek %. Přesnost variant RKR a Meteoromu je vyrovnaná.

- **Teplota v horní části zásobníku (Tab. 26)**

Oproti předešlým posouzením dosahují statistické metody nižších odchylek v chladnějším období roku, kdy je teplota udržována především elektrickým zdrojem tepla na stálé teplotě, než v letním období, kdy jsou dosaženy větší rozdíly odchylek vlivem zapojení solárního termického systému. V období 13/14 dosahují parametry rMAD a rRMSD, kromě letního období, ve variantě RKR nižších odchylek než Meteorom, v průměru do 10 %. Naopak v období 14/15 se poměr nižších odchylek vyrovnal. Hodnoty PKK R dosahují v průběhu celého roku nízkých hodnot v obou variantách. Je to způsobeno ovlivnitelností PKK R odlehlými daty, způsobených dynamickým počasím.

## F ZÁVĚR

Technický rozvoj a pokrok po 2. světové válce výrazně ovlivnil stavebnictví v mnoha směrech. Jednou z nejdůležitějších novinek byly IT technologie a prostřednictvím nich numerické simulace, které nám umožňují modelovat celé budovy, jejich provoz a technické systémy. Lépe tak dokážeme vyhodnotit jejich chování, dosáhnout vyšší účinnosti a efektivnosti energetických systémů, ale i ovlivnit šetrnost budov vůči životnímu prostředí. Numerické simulace jsou ale velmi závislé na vstupních údajích. Fyzikální model budovy a chování jejich uživatelů jsou již v dnešní době dobře popsitelné, hlavně u větších budov, které nejsou svými uživateli tak ovlivnitelné. Naopak venkovní klimatické podmínky, pokud nejsou dlouhodobě sledovány, mohou způsobit chyby ve výsledcích numerických simulací a tím ovlivnit finanční stránku návrhu budovy. Z těchto důvodů se v současnosti používají klimatické roky, které vznikají na základě víceletého měření, zpravidla 15 až 30 let.

Disertační práce hodnotí a analyzuje vhodnost použití RKR dle ČSN EN ISO 15927-4 pro návrh a hodnocení solárního termického systému. RKR je porovnáván s komerčně nejběžnější klimatickou databází na našem území, a to s Meteorormem. V průběhu řešení práce bylo na základě stanovených cílů dosaženo těchto výsledků:

### **1. Monitorování solárního termického systému, vnitřního prostředí a klimatických podmínek na vybraném objektu**

V období 4.6 2012 až 28.7 2015 probíhal kontinuální sběr dat o solárním termickém systému, který ukázal poddimenzování solárního akumulčního zásobníku.

Na základě analýzy byl použit BRL separační model pro stanovení dílčích složek globálního slunečního ozáření měřeného na budově.

Díky měření venkovních klimatických podmínek a vnitřního prostředí budovy se podařilo sestavit 2 testovací klimatické roky - 19.2 2013 až 18.4 2014 resp. 5.6 2014 až 4.6 2015, které sloužily pro ověření numerických simulací.

## **2. Porovnání GLB jednotlivých klimatických roků použitých v numerických simulacích**

Roční sumy GLB databáze Meteonorm dosahují o 2,5 % menší rozdíl než RKR, oproti měření v Rapoticích, v období 2013/2014 resp. 2014/2015.

Přestože roční sumy při porovnání nedosahují velkých odchylek, v případě měsíčního porovnání jsou výsledky výrazně jiné. V případě roku 2013/2014 jsou odchylky v řádu desítek procent a v roce 2014/2015 i stovek procent ve sledovaných parametrech. To dokazuje, že v případě použití i dvouletého místního měření budou výsledky silně ovlivněny dynamickým vývojem počasí oproti klimatickým rokům typu RKR či Meteonorm.

## **3. Numerická simulace solárního termického systému pro různé okrajové podmínky**

Bylo zpracováno celkem 6 numerických simulací pro posuzované období 2013/2014 resp. 2014/2015. Porovnávala se dodaná energie solárním termickým systémem zásobníku TV.

V letním období 2013/2014 jsou rozdíly mezi RKR a Meteonormem malé, maximální rozdíl mezi těmito variantami je 3,4 %. Ve zbylých měsících RKR oproti Meteonormu dosahuje lepších výsledků, a to až o desítky %.

V období 2014/2015 se zvýšila spotřeba teplé vody a tím se stabilizovaly rozdíly porovnávaných simulací oproti měření na stavbě v průměru do 50 %, kromě zimních maxim. RKR dosahuje průměrně o 15 % menších rozdílů než Meteonorm.

## **4. Porovnání měření a numerických simulací termického solárního systému**

Porovnání numerických simulací se provádělo pro 3 vybrané parametry pomocí 4 statistických metod. Porovnávaly se roční a měsíční údaje.

Z ročního porovnání vyplývá, že RKR dosahuje menších odchylek než Meteonorm v případě statistických metod rMAD a rRMSD. Maximální

odchylka činí 7,8 % u teploty kolektoru na výstupu. V horní části zásobníku, který je méně ovlivněn okrajovými podmínkami, je maximální odchylka pouze 0,7 %.

Odchytky rMAD a rRMSD u posuzovaných parametrů teploty kolektoru na výstupu a v horní části zásobníku vychází ve prospěch RKR. U prvního parametru jsou odchytky až o desítky procent menší než u Meteonormu. V případě teploty v horní části zásobníku dosahuje v roce 2013/2014 RKR menších odchylek do 10 %. V roce 2014/2015 jsou odchytky velmi vyrovnané.

Ze všech provedených posouzení a měření v této disertační práci lze závěrem konstatovat, že Referenční klimatický rok dosahuje mírně lepších výsledků než klimatický rok vytvořený z databáze Meteonorm a je tedy vhodnější pro návrh a hodnocení solárního termického systému na území ČR.

## **G MOŽNOST NAVAZUJÍCÍHO VÝZKUMU**

Na základě řešení předmětné disertační práce jsou navrhovány 2 směry navazujícího výzkumu:

- **Porovnání středně velkého solárního termického systému**

V předmětné disertační práci se využívala data RKR pro simulaci solárního termického systému na RD v časovém úseku 2 roky. Pro další hodnocení dat RKR je třeba provést posouzení s delším časovým úsekem, aby se omezeně eliminoval vliv dynamického vývoje počasí, a použít větší solární termický systém, aby se ověřila jejich použitelnost pro větší instalace. Byla navázána spolupráce se střediskem ekologické výchovy Kaprálův mlýn nedaleko obce Ochoz u Brna (kapacita 50 lůžek), kde je instalován středně velký solárně termický systém pro ohřev TV a vytápění.

- **Komparativní studie separačních modelů**

V kapitole B.2.4 a E.1.4 byly popisovány separační modely výpočtu difúzní složky globálního slunečního záření. Existuje řada zahraničních studií, kde jsou jednotlivé výpočetní modely porovnávány pro danou lokalitu. Cílem je provést komparativní studii a vybrat z dostupných modelů vhodný pro naše území. Porovnání bude provedeno pro několik vybraných lokalit, aby se zohlednily nejen polohopisné a výškopisné podmínky, ale i vliv obyvatelstva a účinky městských tepelných ostrovů. Porovnání se provede s víceletým měřením dat slunečního ozáření z radiační sítě ČHMÚ.



## H SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

### H.1 Literatura

- ANDERSEN, B. et al. *Meteorological data for design of building and installation: A reference year* (Report No. SBI-89). Danish Govt. Build. Res. Inst. 1974.
- ANGSTROM, A. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1924, 50(210), 121-126. ISSN 00359009.
- ASHRAE. *Weather Year for Energy Calculations*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 1985.
- BALLING, R. C. a S. B. IDSO. Sulfate aerosols of the stratosphere and troposphere: Combined effects on surface air temperature. *Theoretical and Applied Climatology*. 1991, 44(3-4), 239-241. ISSN 0177-798X.
- BENSEMAN, R.F. a F.W. COOK. Solar radiation in New Zealand-the standard year and radiation on inclined slopes. *N.Z. J. Sci.* 1969, 4(12), 696-708.
- BOLAND, John, Barbara RIDLEY a Bruce BROWN. Models of diffuse solar radiation. *Renewable Energy*. 2008, 33(4), 575-584. ISSN 09601481.
- CANO, D. et al. A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*. 1986, 37(1), 31-39.
- CIBSE. *Weather, solar and illuminance data*. London: Chartered Institution of Building Services Engineers. 2002. ISBN 19-032-8712-X.
- CIHELKA, Jaromír. *Solární tepelná technika*. Praha: T. Malina, 1994. ISBN 80-900-7595-9.
- DERVISHI, Sokol a Ardeshir MAHDAVI. Computing diffuse fraction of global horizontal solar radiation: A model comparison. *Solar Energy*. 2012, 86(6), 1796-1802.
- DUFFIE, John A. a William A. BECKMAN. *Solar engineering of thermal processes*. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 2013. ISBN 978-111-8671-603.
- ENGERER, N.A. Minute resolution estimates of the diffuse fraction of global irradiance for southeastern Australia. *Solar Energy*. 2015, 116, 215-237.

- ERBS, D.G., S.A. KLEIN a J.A. DUFFIE. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*. 1982, 28(4).
- FERRARI, D. and LEE, T. BEYOND TMY: Climate data for specific. In: *3rd International Solar Energy Society Conference - Asia Pacific Region (ISES-AP-08)*, Chambéry, Sydney, 2008.
- FINKELSTEIN, J. M. a R. E. SCHAFER. Improved goodness-of-fit tests. *Biometrika*. 1971, 58(3), 641-645.
- GUEYMARD, Christian A., Jose A. RUIZ-ARIAS a J.A. DUFFIE. Extensive worldwide validation and climate sensitivity analysis of direct irradiance predictions from 1-min global irradiance. *Solar Energy*. 2016, 128(1), 1-30.
- GÜNTHER, Matthias. *Advanced CSP Teaching Materials: Chapter 2, Solar Radiation*. 2013. Učební text. Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).
- HALL L. et al. *Generation of Typical Meteorological Years for 26 SOLMET stations*. Rapport technique SAND78-1601, Sandia National Lab., Albuquerque, NM. 1978
- HAN, Y.M., R.Z. WANG a Y.J. DAI. Thermal stratification within the water tank. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009, 13(5), 1014-1026.
- HENDL, Jan. *Přehled statistických metod: analýza a metaanalýza dat*. 4., rozš. vyd. Praha: Portál, 2012. ISBN 978-80-262-0200-4.
- HERRERA, Manuel et al. A review of current and future weather data for building simulation. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2017, 38(5), 602-627.
- JELÍNEK, Petr, Jiří SEDLÁK a Barbora LIŠKOVÁ. Comparison of Polysun Simulation with Direct Measurements of Solar Thermal System in Rapotice. *Advanced Materials Research*. 2014, 1041, 158-161. ISSN 1662-8985.
- JENTSCH, Mark F, Matt E EAMES a Geoff J LEVERMORE. Generating near-extreme Summer Reference Years for building performance simulation. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2015, 36(6), 701-727. ISSN 0143-6244.
- KALOGIROU, Soteris. *Solar energy engineering: processes and systems*. Second edition. Boston: Elsevier, AP, Academic Press is an imprint of Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-397270-5.

- KANTERS, Jouri, Miljana HORVAT a Marie-Claude DUBOIS. Tools and methods used by architects for solar design. *Energy and Buildings*. 2014, 68, 721-731. ISSN 03787788.
- KLECZEK, Josip. *Sluneční energie: úvod do helioenergetiky*. Praha: SNTL, 1981.
- KVĚTOŇ, Vít a et al. *Databáze referenčních klimatických roků pro území ČR*. Praha, 2010. Technická zpráva o plnění neinvestiční dotace MPO č. 122142 – 9801. Český hydrometeorologický ústav ČHMÚ.
- LADENER, Heinz a Frank SPÄTE. *Solární zařízení*. Praha: Grada, 2003. Stavitel. ISBN 80-247-0362-9.
- LAHODA, Marek. *Variabilita celkového slunečního záření v Brně v letech 2011–2013*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Geografický ústav.
- LANINI, Fabienne. *Division of global radiation into direct radiation and diffuse radiation*. Bern, 2010. Master's thesis. Faculty of Science University of Bern.
- LAUGHTON, Chris. *Solar domestic water heating: the Earthscan expert handbook for planning, design, and installation*. Washington, DC: Earthscan, 2010. Earthscan expert series. ISBN 978-1-84407-736-6.
- LIU, Benjamin Y.H. a Richard C. JORDAN. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*. 1960, 4(3). ISSN 0038092x.
- LIU, C., T. KERSHAW, M.E. EAMES a D.A. COLEY. Future probabilistic hot summer years for overheating risk assessments. *Building and Environment*. 2016, 105, 56-68. ISSN 03601323.
- LUND, H. (1995). *The design reference year users manual*. Thermal Insulation Laboratory Report 274, Technical University of Denmark
- MATUŠKA, Tomáš a Bořivoj ŠOUREK. Revize TNI 73 0302 pro zjednodušené hodnocení solárních tepelných soustav. *Vytápění, větrání, instalace*. 2014, 23(4), 184-188. ISSN 1210-1389
- MATUŠKA, Tomáš. Navrhování solárních zásobníků. *Alternativní energie*. 2012, 2012(1), 8-10. ISSN 1212-1673.
- MATUŠKA, Tomáš. *Solární zařízení v příkladech*. Praha: Grada, 2013. Stavitel. ISBN 978-80-247-3525-2.

- MEADOWS, Donella H. *The Limits to growth: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*. New York: Universe Books, 1972. ISBN 08-766-3165-0.
- MECHERIKUNNEL, A. T. a J. C. RICHMOND. *Spectral Distribution of Solar Radiation: Technickal memorandum 82021*. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, United States, 1980.
- MUNEER, T., C. GUEYMARD a H. KAMBEZIDIS. *Solar radiation and daylight models: (with software available from companion web site)*. 2nd ed. Burlington, MA: Elsevier Butterworth Heinemann, c2004. ISBN 07-506-5974-2.
- NAROWSKI P., Janicki M. and Heim D. Comparison of untypical meteorological years (UMY) and their influence on building energy performance simulations. In: *13th Conference of International Building Performance Simulation Association*”, Chambéry, France, 2013, s. 1414-1421.
- NCDC. *Test Reference Year (TRY)*, Tape Reference Manual, TD-9706. Asheville, North Carolina: National Climatic Data Center, U.S. Department of Commerce. 1976
- OLIVA, Axel et al. Solar-Active-Houses - Dynamic System Simulations to Analyze Building Concepts with High Fractions of Solar Thermal Energy. *Energy Procedia*. 2015, 70, 652-660.
- PEREZ, R. et al. Dynamic Models for hourly global-to-direct irradiance conversion. *Proceedings of the Biennial Congress of the International Solar Energy Society*, Denver, Colorado, USA, 1991.
- QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.
- RAMLOW, Bob. a Benjamin. NUSZ. *Solar water heating: a comprehensive guide to solar water and space heating systems*. Rev. and expanded ed. Gabriola, B.C.: New Society Publishers, c2010. ISBN 978-0-86571-668-1.
- REINDL, D.T., W.A. BECKMAN a J.A. DUFFIE. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy*. 1990, 45(1), 1-7. ISSN 0038092x.
- REMUND, Jan et al. *Meteonorm: Handbook part I – Software and Handbook part II - Theory*. Bern: METEOTEST, 2017.
- Renewables 2018: Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat, 2018. ISBN 978-3-9818911-3-3.
- RIDLEY, Barbara, John BOLAND a Philippe LAURET. Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors. *Renewable Energy*. 2010, 35(2), 478-483.

- SEDLÁK, Jiří a Milan OSTRÝ. Klimatická hodinová data pro posuzování energetické potřeby pro vytápění a chlazení. *Vytápění, větrání, instalace*. Praha, 2010, 19.(3), 148-152. ISSN 1210-1389.
- SENGUPTA, Majit et al. *Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Second Edition*. 2017. Technical Report. National Renewable Energy Lab. (NREL).
- SHRIVASTAVA, R.L., VINOD KUMAR a S.P. UNTAWALE. Modeling and simulation of solar water heater: A TRNSYS perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 67, 126-143. ISSN 13640321
- SCHOVANKOVÁ, Jana. *Vztahy mezi slunečním svitem, globálním zářením, oblačností a délkou dne, hlavně v Hradci Králové*. Praha, 2010. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie.
- SMOLA, Josef. *Stavba a užívání nízkoenergetických a pasivních domů*. Praha: Grada, 2011. Stavitel. ISBN 978-80-247-2995-4.
- SOTNIKOV, Artem et al. Simulations of a Solar-Assisted Block Heating System. In: *Proceedings of the ISES Solar World Conference 2017 and the IEA SHC Solar Heating and Cooling Conference for Buildings and Industry 2017*. International Solar Energy Society. 2018, s. 373-383. ISBN 978-3-981 465 9-7-6.
- SPENCER, J.W. *Fourier series representation of the position of the Sun*. Search 2 (5), 172. 1971.
- STRAHLER, Alan H. *Introducing physical geography*. 5th ed. Chichester: John Wiley [distributor], c2011. ISBN 978-0470-13486-3.
- THIRUGNANASAMBANDAM, Mirunalini, S. INIYAN a Ranko GOIC. A review of solar thermal technologies: the origin, evolution, and impact of doi moi. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010, 2000, 14(1), 312-322.
- TOLASZ, Radim. *Atlas podnebí Česka: Climate atlas of Czechia*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2007. ISBN 978-80-86690-26-1.
- VANÍČEK, Karel a Pokorný JIŘÍ. Vytváření datových souborů globálního záření pro referenční klimatické roky na území ČR. *Meteorologické zprávy*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2010, 63(3), 69-75. ISSN 0026-1173.
- VANÍČEK, Karel, et al. *Měření složek radiační bilance a dlouhodobé změny globálního záření v České republice: Measurements of radiation balance components and long-term global solar radiation changes in the Czech Republic*. Praha: ČHMÚ, 2015. ISBN 978-80-87577-51-6.

- VRTEK, Mojmír. *Sluneční energie*. Ostrava, 2012. Učební text. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky.
- WALL, Maria et al. Achieving Solar Energy in Architecture-IEA SHC Task 41. *Energy Procedia*. 2012, 30, 1250-1260.
- Wehrli, C. *Extraterrestrial Solar Spectrum*, Publication no. 615, Physikalisch-Meteorologisches Observatorium + World Radiation Center (PMO/WRC) Davos Dorf, Switzerland, July 1985.
- WILD, Martin. Enlightening Global Dimming and Brightening. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012, 93(1), 27-37.
- WILKS, Daniel S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. 2nd ed. Boston: Academic Press, c2006. ISBN 978-0-12-751966-1.
- WMO. *Guide to meteorological instruments and methods of observation*. 8th ed. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2014. ISBN 978-926-3100-085.
- WMO. *Commission for Instruments and Methods of Observation: abridged final report of the eighth session, Mexico City, 19-30 October 1981*. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization, 1982. ISBN 92-631-10590-1.

## H.2 Ostatní zdroje

ASHRAE. *International Weather for Energy Calculations (IWECC Weather Files) Users Manual and CD-ROM*, Atlanta: ASHRAE. 2001

ČSN 73 0540-2 Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky. ÚNMZ, 2011

ČSN EN ISO 15927-4: *Tepelně vlhkostní chování budov - Výpočet a uvádění klimatických dat - Část 4: Hodinová data pro posuzování roční energetické potřeby pro vytápění a chlazení*. ÚNMZ, 2011.

*ELAM: realizační dokumentace rodinného domu v Rapoticích*. Projekční ateliér ELAM: vedoucí projektant Ing. arch. Mojmír Hudec, 2010.

*EPBD II - Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU ze dne 19. května 2010 o energetické náročnosti budov (přepřpracování)*. 2010, Úřední věstník Evropské unie L 153/13.

*EPBD III - Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/844 ze dne 30. května 2018, kterou se mění směrnice 2010/31/EU o energetické náročnosti budov a směrnice 2012/27/EU o energetické účinnosti*. 2018, Úřední věstník Evropské unie L 156/75.

International Electrotechnical Commission, 1987: *International Electrotechnical Vocabulary, Chapter 845: Lighting, IEC 60050-845*. Geneva.

KLEIN, S.A. et al, 2017, *TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program*, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA, <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>

LÍŠKOVÁ, Barbora, JELÍNEK, Petr a Milan OSTRÝ. *Indoor climate in a passive house made of natural materials*. World Sustainable Energy Days - Young Researchers' Conference. Poster presentation, Wels, 2015.

*Obnovitelné zdroje energie v roce 2016*. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, 2017.

Polysun simulation software - User manual. Vela Solaris AG. 2017.

*Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU ze dne 19. května 2010 o energetické náročnosti budov*. EU, 2010, Úř. věst. L 153, s. 13-35.

*Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2012/27/EU ze dne 25. října 2012 o energetické účinnosti, o změně směrnic 2009/125/ES a 2010/30/EU a o zrušení směrnic 2004/8/ES a 2006/32/ES*. 2012, Úřední věstník Evropské unie L 315/1.

*Solární kolektory pro ohřev vody v bývalém Československu 1977–1992.*

Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, 2006.

*Spotřeba paliv a energií v domácnostech.* Praha: Český statistický úřad, 2017.

Průmysl, energetika. ISBN 978-80-250-2751-6.

Technické listy jednotlivých měřících zařízení, aparátů a dalšího vybavení.

*TNI 73 0302 - Energetické hodnocení solárních tepelných soustav:*

*Zjednodušený výpočtový postup.* Praha: ÚNMZ, 2014.

*World Energy Outlook 2018: Executive summary.* International Energy Agency,

2017.



### H.3 WWW zdroje

- Ahlborn* [online]. [cit. 2018-07-11]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/>
- BilanceSS: Zjednodušená měsíční metoda pro bilancování solárních tepelných soustav* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/>
- DesignBuilder* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <https://designbuilder.co.uk>
- Dražice* - [online]. [cit. 2018-07-02]. Dostupné z: <http://www.dzd.cz/>
- EnergyPlus* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <https://www.energyplus.net/>
- F-Chart Software: solar system analysis* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <http://www.fchart.com/>
- GetSolar: Simulation software for solar thermal systems* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <https://www.etu-software.com/M/SOFTWARE/Renewables-Simulation/GetSolar-Professional/Seite.html,154166,96653>
- CHMI - RKR: Referenční klimatický rok pro ČR* [online]. [cit. 2018-08-07]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/informace-pro-vas/referencni-klimaticky-rok>
- CHMI: měsíční historická data* [online]. [cit. 2018-08-03]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mesicni-data>
- INSEL: Renewable Energy Simulation* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <http://www.insel.eu/en/>
- Junkers Solarsimulation* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <http://www.junkers.cz/>
- Kalkener* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <http://kalkener.com/en/>
- Kipp & Zonen* [online]. [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: <http://www.kippzonen.com/Products>
- Lazard: Lazard's levelized cost of energy analysis - version 12.0* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://www.lazard.com/media/450784/lazards-levelized-cost-of-energy-version-120-vfinal.pdf>
- Meteonorm 7.2* [online]. [cit. 2018-06-08]. Dostupné z: <http://www.meteonorm.com/>
- Meteostanice* [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <https://www.conrad.com/>

- Meteostanice VUT FAST* [online]. [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: <http://uvhk.fce.vutbr.cz/cs/meteostanice>
- Meteotest* [online]. [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://meteotest.ch/>
- Omega* [online]. [cit. 2018-07-04]. Dostupné z: <https://www.omega.com/>
- Oventrop: Online Solarberechnung von Thermischen Solaranlagen* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <http://oventrop.solar-software.de/>
- Polysun online: Solar-Calculator* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <http://www.polysunonline.com/PsoPublic/app/home/access>
- Polysun* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <http://www.velasolaris.com/>
- POWER: Prediction of Worldwide Energy Resource* [online]. [cit. 2018-06-08]. Dostupné z: <https://power.larc.nasa.gov/>
- PVGIS: Photovoltaic Geographical Information System* [online]. [cit. 2018-06-12]. Dostupné z: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis.html>
- Radiační bilance zemského povrchu* [online]. [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: [http://science-edu.larc.nasa.gov/energy\\_budget/](http://science-edu.larc.nasa.gov/energy_budget/)
- SoDa: solar radiation data* [online]. [cit. 2018-06-08]. Dostupné z: <http://www.soda-pro.com/>
- Solar Thermal History* [online]. [cit. 2017-12-28]. Dostupné z: <http://californiasolarcenter.org/history-solarthermal/>
- Solar: Návrhový a výpočetní program pro návrh solárních systémů* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <http://www.reflexcz.cz/>
- SOLARGIS* [online]. [cit. 2018-06-08]. Dostupné z: <https://solargis.info/>
- SOLARGIS: TMY data* [online]. [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <https://solargis.com/products/time-series-and-tmy-data/overview/>
- Solární kolektor* [online]. [cit. 2018-12-21]. Dostupné z: <http://www.svobodaaspol.cz>
- Sunpower* [online]. [cit. 2018-07-04]. Dostupné z: <http://www.sunpower.cz/>
- T\*SOL Online Calculation: Online Solar Calculation and Simulation of Solar Thermal Systems* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <http://valentin.de/calculation/thermal/start/en>
- TA - Technische Alternative RT GmbH* [online]. [cit. 2018-07-04]. Dostupné z: <https://www.ta.co.at/>

- TECSOL - Thermique* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <http://www.tecsol.fr/>
- The History od Solar* [online]. [cit. 2017-12-28]. Dostupné z: <https://energy.gov/>
- TRANSOL: Solar Thermal Energy* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <https://aiguasol.coop/>
- TRNSYS: Transient System Simulation Tool* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <http://www.trnsys.com/>
- TUBO - permanentní GPS stanice* [online]. [cit. 2018-07-11]. Dostupné z: <http://tubo.fce.vutbr.cz>
- Valentin Software* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <https://www.valentin-software.com/>
- Viessman ESOP Online* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <http://viessmann.solar-software.de/>
- Weather Bank* [online]. [cit. 2018-06-08]. Dostupné z: <http://www.weatherbank.com/archive.html>
- Weather Source* [online]. [cit. 2018-06-08]. Dostupné z: <https://weathersource.com>
- White Box Technologies: Weather data for energy calculation* [online]. [cit. 2018-06-08]. Dostupné z: <http://weather.whiteboxtechnologies.com/>
- Wisconsin University - TRNSYS* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>
- WRDC: World Radiation Data Centre* [online]. [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: <http://wrdc.mgo.rssi.ru>

## I SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Označení	Název	Jednotka
AM	Air Mass (optická tloušťka atmosféry)	
AST	Zdánlivý sluneční čas	hh:mm
BRL	Boland - Ridley - Lauret (separační model)	
ČR	Česká republika	
DIFd	Denní suma difúzního slunečního ozáření	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$
DIRd	Denní suma přímého slunečního ozáření	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$
DRY	Design Reference Year	
DSY	The Design Summer Year	
DWD	German Weather Service	
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive (Směrnice o energetické náročnosti budov)	
<i>Esol</i>	Sluneční ozáření na plochu absorberu kolektorů	KWh
EU	Evropská unie	
GEBA	Global Energy Balance Archive	
GLBd	Denní suma globálního slunečního ozáření	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$
Globalsod	Global surface daily data	
gradGLB	Vertikální gradient globálního slunečního záření	%
<i>h</i>	Výška slunce nad obzorem	rad nebo °
HSY	The Hot Summer Year	
<i>I</i> / GLB	Globální sluneční ozáření	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
<i>I(T)</i>	Intenzita záření slunce (černého tělesa)	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
<i>I<sub>b</sub></i> / DIR	Přímé slunečné ozáření	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
<i>I<sub>d</sub></i> / DIF	Difúzní slunečné ozáření	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
<i>I<sub>d,cs</sub></i>	Cirkumsolární difúzní záření	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
<i>I<sub>d,hz</sub></i>	Difúzní sluneční ozáření ze zjasněného horizontu	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
<i>I<sub>d,izo</sub></i>	Izotropická složka difúzního slunečního ozáření	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
IEC	International Electrotechnical Commission	
<i>I<sub>ext</sub></i>	Extraterrestrální insolace	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
<i>I<sub>r</sub></i>	Difúzní ozáření odražené od zemského povrchu	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
<i>I<sub>sc</sub></i>	Solární konstanta	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
IWEC	The International Weather for Energy Calculations	
<i>K<sub>d</sub></i>	Podíl difúzního záření (diffuse fraction)	-
<i>K<sub>t</sub></i>	Index jasnosti / propustnost / průzračnosti atmosféry (clearness index)	-
MBD	Mean Bias Deviation	
<i>n</i>	Počet hodnot /	
NED	Nízkoenergetický dům	
NRC	Národní radiační centrum	
OZE	Obnovitelné zdroje energie	
<i>p</i>	Tlak vzduchu	Pa
PD	Pasivní dům	
PHPP	Passive House Planning Package	
R / PKK R	Pearsonův korelační koeficient	-

PV/T	Photovoltaic/Thermal systems (hybridní kolektory)	
$R_n$	Skutečná vzdálenost mezi sluncem a zemí v závislosti na dni v roce	
$r_{AU}$	Střední vzdálenost Země od Slunce, tzv. astronomická jednotka AU	m
$R_{av}$	Průměrná vzdálenost mezi sluncem a zemí	
RKR	Referenční klimatický rok	
rMAD	Relative Mean Absolut Deviation (relativní průměrná absolutní odchylka)	%
rMBD	Relative Mean Bias Deviation (relativní střední odchylka)	%
RMSD	Root Mean Square Deviation	
rRMSD	Relative Root Mean Square Deviation (relativní směrodatná odchylka)	%
$r_{Slunce}$	Poloměr slunce	m
SMO	Světová meteorologická organizace (World Meteorological Organization - WMO)	
SOO	Solární a ozónová observatoř	
SRY	The Summer Reference Year	
$S_{sol}$	Dodaná energie zásobníku	kWh
SSV	Délka (trvání) slunečního svitu	Hod
STK	Solární termické kolektory	
$T$	Termodynamická teplota	K
$T_a$	Venkovní teplota vzduchu	°C
TI	Tepelná izolace	
$T_i$	Vnitřní teplota vzduchu	°C
TMY	Typical meteorological years	
TRNSYS	Transient System Simulation Tool	
TRY	Test reference year	
TV	Teplá voda	
U	Součinitel prostupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
UMY	The Untypical Meteorological Year	
WMO	World Meteorological Organization	
WRC	World Radiation Center	
WRDC	World Radiation Data Centre	
WRR	World Radiation Reference	
WYEC	Weather Year for Energy Calculations	
XMY	The Extreme Meteorological Year	
$y_i$	Veličina měřená	
$\hat{y}_i$	Veličina odhadovaná (vypočítaná)	
$\bar{y}$	Výběrový průměr měřené veličiny	
$\alpha$	Výška slunce nad obzorem	°
$\eta$	Účinnost solárního termického systému	%
$\Theta$	Zenitový úhel slunce	rad nebo °
$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
$\Phi$	Relativní vlhkost vzduchu	-
$\psi$	Proměnná variability	-

## J SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Orientační rozdělení obytných budov podle měrné potřeby energie na vytápění na území ČR (ČSN 73 0540-2, 2011).....	9
Obr. 2 - Radiační bilance zemského povrchu, hodnoty v % (Radiační bilance zemského povrchu, 2017) .....	13
Obr. 3 - Levá část: výška slunce nad obzorem (h) a zenitový úhel ( $\Theta$ ), Pravá část: Označení referenčních spekter pro různé pozice Slunce na obloze zadané zenitovým úhlem .....	15
Obr. 4 - Spektrální charakteristika zářivého slunečního toku pro různá referenční spektra (Vrtek, 2012).....	16
Obr. 5 - Aktinometr .....	18
Obr. 6 - Segmentový pyranometr .....	18
Obr. 7 - Grafické znázornění složek globálního slunečního záření .....	18
Obr. 8 - Stanice radiační sítě ČHMÚ (Vaníček, 2015) .....	21
Obr. 9 - Vývoj globálního ozáření měřeného v SOO Hradec Králové (Vaníček, 2015).22	
Obr. 10 - Odhadovaný podíl obnovitelných zdrojů na celkové spotřebě energie v roce 2016 (Renewables, 2018) .....	25
Obr. 11 - Vývoj plochy činných solárních termických kolektorů (Obnovitelné zdroje energie v roce 2016, 2017).....	26
Obr. 12 - Obecné schéma solárního termického systému s bivalentním solárním zásobníkem.....	27
Obr. 13 - Základní členění solárních termických kolektorů (Matuška, 2013) .....	29
Obr. 14 - Základní rozdělení zásobníku tepla podle principu akumulace tepla.....	30
Obr. 15 - Pracovní prostředí v softwaru Polysun EDUCATIONAL, verze 10 .....	36
Obr. 16 - Ukázka výběru typických měsíců pro TMY (Solargis, 2018) .....	38
Obr. 17 - Oblasti působnosti páteřních stanic (ohrazeny černě) a doplňkových stanic (Květoň, 2010).....	42
Obr. 18 - Rozmístění stanic RKR (páteřní a doplňkové - červené) a podpůrných stanic (modré), (Květoň, 2010) .....	43
Obr. 19 - Meteorologické stanice v ČR využívané aplikací Meteonorm 7.2, červeně označené stanice s měřením slunečního záření (Meteonorm, 2018) .....	45
Obr. 20 - RD v Rapoticích (foto autora) .....	50
Obr. 21 - Dispozice RD (ELAM, 2010).....	50
Obr. 22 - Schéma solárního systému .....	51
Obr. 23 - Solární akumulační zásobník (foto autora) .....	51
Obr. 24 - Schéma řízení a monitoringu solárního termického a VZT systému .....	53
Obr. 25 - Řízení a umístění dataloggerů na stavbě .....	54
Obr. 26 - OM-EL-USB-2 (foto autora) .....	55
Obr. 27 - OM-PLTH (foto autora).....	55
Obr. 28 - Umístění měřících zařízení na budově .....	56

Obr. 29 - Záznam měření solárního termického systému v letním období 17. až 24.7 2013 .....	62
Obr. 30 - Záznam měření solárního termického systému v zimním období 26.11 až 3.12 2013.....	63
Obr. 31 - Průběh teploty a relativní vlhkosti vzduchu v interiéru RD Rapotice.....	66
Obr. 32 - Průběh teploty, relativní vlhkosti vzduchu a rychlosti větru v exteriéru RD Rapotice.....	67
Obr. 33 - Průběh měřeného globálního slunečního ozáření a vypočítaného difúzního slunečního ozáření na budově RD Rapotice, fialovou a zelenou barvou je označeno nahrazené měření .....	68
Obr. 34 - Nahrazené bloky dat slunečního záření v I. testovacím roku .....	69
Obr. 35 - Délky trvání slunečního svitu ve vybraných obdobích meteorologické stanice Brno, Tuřany (CHMI, 2018) .....	69
Obr. 36 - Porovnání závislosti parametrů $k_d$ na $k_t$ u modelů BRL a Reindl2 s měřením ve Vídni .....	72
Obr. 37 - Porovnání měsíčních sum GLB mezi jednotlivými klimatickými roky použitých pro numerickou simulaci.....	76
Obr. 38 - Model systému v programu Polysun, ovládací prvky: modrá čára - vstupní data, růžová čára - řídicí výstup) .....	77
Obr. 39 - Porovnání tepelné energie dodané zásobníku pro referenční rok 2013/2014 a různé varianty simulace, sloupcový graf znázorňuje globální sluneční ozáření a spojnicový dodanou energii zásobníku termálního solárního systému.....	79
Obr. 40 - Rozdíly tepelné energie dodané zásobníku pro referenční rok 2013/2014, rozdíly jsou stanovené od měřených hodnot kalorimetrem .....	80
Obr. 41 - Průběh měření na stavbě (označeno Rap) a 2 variant simulace solárního termického systému (varianta RKR a Meteonorm) v období od 13.4 do 20.4 2013. Porovnává se teplota na výstupu z kolektoru (označení „kol“) a v horní části zásobníku (označení „horZás“).....	81
Obr. 42 - Průběh měření na stavbě (označeno Rap) a 2 variant simulace solárního termického systému (varianta RKR a Meteonorm) v období od 13.4 do 20.4 2013. Porovnává se teplota na výstupu z kolektoru (označení „kol“) a ve spodní části zásobníku (označení „spoZás“) .....	81
Obr. 43 - Průběh měření na stavbě (označeno Rap) a 2 variant simulace solárního termického systému (varianta RKR a Meteonorm) v období od 13.6 do 20.6 2013. Porovnává se teplota na výstupu z kolektoru (označení „kol“) a v horní části zásobníku (označení „horZás“) .....	82
Obr. 44 - Průběh měření na stavbě (označeno Rap) a 2 variant simulace solárního termického systému (varianta RKR a Meteonorm) v období od 13.6 do 20.6 2013. Porovnává se teplota na výstupu z kolektoru (označení „kol“) a ve spodní části zásobníku (označení „spoZás“) .....	82
Obr. 45 - Porovnání tepelné energie dodané zásobníku pro referenční rok 2014/2015 a různé varianty simulace, sloupcový graf znázorňuje globální sluneční ozáření a spojnicový dodanou energii zásobníku termálního solárního systému.....	85
Obr. 46 - Rozdíly tepelné energie dodané zásobníku pro referenční rok 2014/2015....	85

Obr. 47 - Rozmezí extraterestrální insolace v průběhu roku .....	114
Obr. 48 - Pyranometr pro měření difúzního záření s manuálně nastavovaným stínícím prstencem (Meteostanice VUT FAST, 2018) .....	114
Obr. 49 - Automatický sledovací systém (Kipp & Zonen, 2018) .....	114
Obr. 50 - Solární termické kolektory SK 218 Freesun (foto autora).....	117
Obr. 51 - Solární akumulční zásobník OKC 300 NTRR/SOL .....	118
Obr. 52 - Meteostanice WH1080 (foto autora; Meteostanice, 2018) .....	119
Obr. 53 - Pyranometr FLA628S na měření globálního záření a datalogger Almemo 2590-4S s externí pamětí SD pro záznam měření pyranometru (foto autora).....	119
Obr. 54 - Porovnání modelů BRL a Reindl1 .....	121

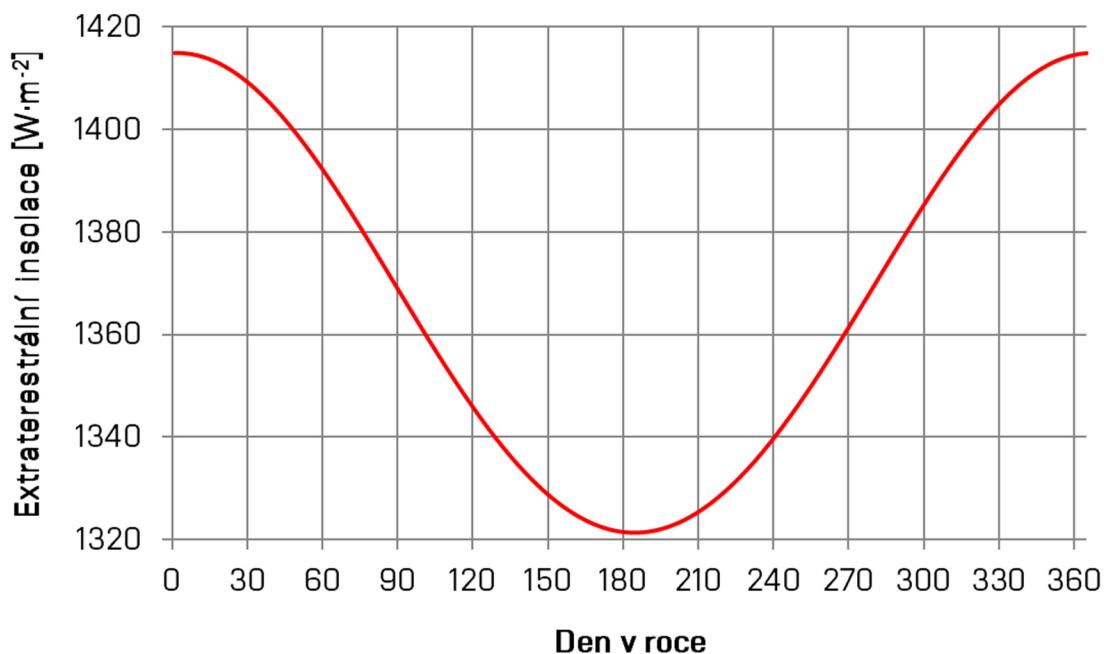


## K SEZNAM TABULEK

Tab. 1 - Seznam vybraných zjednodušených výpočetních nástrojů.....	34
Tab. 2 - Seznam vybraných simulačních nástrojů pro solární termické systémy.....	37
Tab. 3 - Postupný vývoj používaných klimatických roků (metodik).....	39
Tab. 4 - Přehled specifických klimatických roků.....	40
Tab. 5 – Výběr běžně používaných klimatických databází.....	41
Tab. 6 - Technické parametry budovy RD v Rapoticích.....	50
Tab. 7 - Vybrané technické parametry solárního termického systému a VZT okruhu RD.....	52
Tab. 8 - Vybrané technické parametry pyranometru Ahlborn FLA628S (Ahlborn, 2018).....	56
Tab. 9 - Časový podíl stagnace solárního termického systému.....	64
Tab. 10 - Časový podíl bez ohřevu TV solárním termickým systémem.....	64
Tab. 11 - Časový podíl ohřevu TV elektrickou topnou tyčí.....	64
Tab. 12 - Měření spotřeby teplé vody sledovaného objektu.....	65
Tab. 13 - Měření spotřeby energie elektrické topné tyče solárního akumulčního zásobníku.....	66
Tab. 14 - Stanovení průměrné teploty vzduchu v interiéru pro I. a II. testovací rok.....	67
Tab. 15 - Vstupní parametry separačních modelů (Dervishi, 2012).....	70
Tab. 16 - Referenční lokality pro vytvoření modelu BRL (Ridley, 2010).....	71
Tab. 17 - Statistické parametry porovnání separačních modelů.....	73
Tab. 18 - Rozdíl ročních sum globálního slunečního ozáření.....	74
Tab. 19 - Měsíční statistické porovnání dat vybraných kombinací klimatických roků ...	75
Tab. 20 - Rozdíl v dodané energii do zásobníku mezi numerickou simulací a měřeními údaji ze stavby.....	78
Tab. 21 - Měsíční hodnoty účinnosti solárního termického systému pro období 2013/2014.....	84
Tab. 22 - Měsíční hodnoty účinnosti solárního termického systému pro období 2014/2015.....	86
Tab. 23 - Roční statistické porovnání datových sad vybraných parametrů.....	87
Tab. 24 - Měsíční statistické porovnání dat teploty kolektoru na výstupu.....	89
Tab. 25 - Měsíční statistické porovnání dat teploty ve spodní části zásobníku.....	90
Tab. 26 - Měsíční statistické porovnání dat teploty v horní části zásobníku.....	91
Tab. 27 - Seznam stanic radiační sítě ČHMÚ, uvedeny začátky měření jednotlivých parametrů (Vaníček, 2015).....	115
Tab. 28 - Seznam páteřních a doplňkových stanic RKR a dalších stanic použitých k výpočtu GLB, DIF a DIR, X značí naměřená data z téže stanice (Květoň, 2010) ....	116
Tab. 29 - Technické parametry kolektorů SK 218 (Solární kolektor, 2018).....	117
Tab. 30 - Technické parametry zásobníku OKC 300 NTRR/SOL (Dražice, 2018).....	118

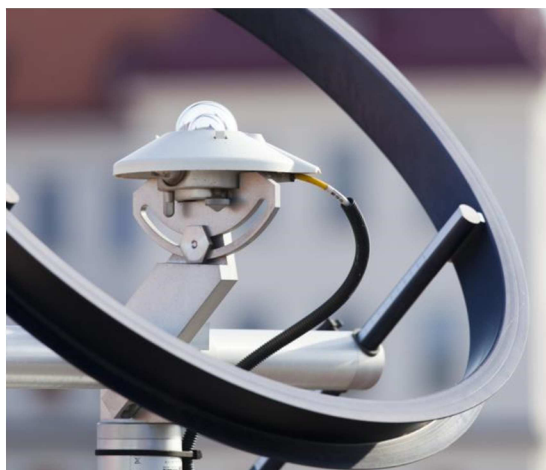
## L PŘÍLOHY

### L.1 Průběh Extraterestrální insolace



Obr. 47 - Rozmezí extraterestrální insolace v průběhu roku

### L.2 Technika pro měření slunečního záření



Obr. 48 - Pyranometr pro měření difúzního záření s manuálně nastavovaným stínícím prstencem (Meteostanice VUT FAST, 2018)



Obr. 49 - Automatický sledovací systém (Kipp & Zonen, 2018)

### L.3 Seznam a popis měření stanic Radiační sítě ČHMÚ

Tab. 27 - Seznam stanic radiální sítě ČHMÚ, uvedeny začátky měření jednotlivých parametrů (Vaníček, 2015)

#	Stanice	Nadmořská výška [m]	GLB	DIF	Poznámka
1	Brno - Tuřany	241	2013		
2	České Budějovice	387	2002		
3	Churáňov	1122	1984		
4	Doksany	158	2003	2013	
5	Holešov	224	2013	2013	
6	Hradec Králové (NRC)	285	1953	1964	DIR - 1953
7	Kocelovice	519	1984	2013	
8	Košetice	470	1984	1995	
9	Kuchařovice	334	1984	1992	
10	Labská bouda	1320	2006		
11	Luká	510	1984		
12	Mošnov	251	2002		
13	Ostrava - Poruba	242	1984		
14	Pizeň - Mikulka	360	2012		
15	Praha - Karlov	254	1984		zvýšená nečistota atmosféry
16	Praha - Libuš	305	1998		
17	Svratouch	737	1984		
18	Tušimice	322	1984	1992 - 2013	zvýšená nečistota atmosféry
19	Ústí nad Labem	375	1984		zvýšená nečistota atmosféry

## L.4 Seznam stanic RKR pro výpočet parametrů slunečního záření

Tab. 28 - Seznam páteřních a doplňkových stanic RKR a dalších stanic použitých k výpočtu GLB, DIF a DIR, X značí naměřená data z téže stanice (Květoň, 2010)

#	Stanice	Nadmořská výška [m]	GLB	DIF	SSV
<b>Páteřní stanice RKR</b>					
1	Brno - Tuřany	241	KUCH	KUCH, KOSE	X
2	Hradec Králové	285	X	X	X
3	Kocelovice	519	X	KOSE, HRAD	X
4	Mošnov	251	PORU	HRAD, KOSE	X
5	Praha – Ruzyně	364	PKAR	KOSE, HRAD	X
6	Ústí nad Labem	375	X	HRAD, KOSE	X
7	Příbrav	530	KOSE	KOSE, HRAD	X
<b>Doplňkové stanice RKR</b>					
1	Churáňov	1122	X	KOSE, KUCH	X
2	Kuchařovice	334	X	X	X
3	Luká	510	X	HRAD, KUCH	X
4	Praha - Karlov	254	X	KOSE, KATU	X
5	Tušimice	322	X	X	X
<b>Referenční stanice radiční sítě - zkratky</b>					
1	Košetice - KOSE	470	X	X	X
2	Kuchařovice - KUCH	334	X	X	X
3	Luká - LUKA	510	X		X
4	Ostrava Poruba - PORU	242	X		X
5	Praha Karlov - PKAR	254	X		X
6	Svratouch - SVRA	737	X		X
7	Tušimice - KATU	322	X	X	X
8	Ústí nad Labem - ULKO	375	X		X
9	Kocelovice - KOCE	519	X		X
10	Hradec Králové - HRAD	285	X	X	X
<b>Podpůrné stanice použité k výpočtu GLB, DIF a DIR</b>					
1	Doksany	158	PKAR	KATU, HRAD	X
2	Holešov	224	LUKA	HRAD, KUCH	X
3	Cheb	483	KATU	KATU, KOSE	X
4	Jeseník	465	PORU	HRAD, KOSE	X
5	Klatovy	430	KOCE	KOSE, KATU	X
6	Košetice	534	X	X	X
7	Liberec	398	ULKO	HRAD, KATU	X
8	Lysá hora	1320	PORU	HRAD, KOSE	X
9	Svratouch	737	X	KOSE, HRAD	X
10	Šumperk	328	LUKA	HRAD, KOSE	X
11	Vráž	436	KOCE	KOSE, KATU	X
12	Vyšší Brod	559	KOCE	KOSE, KATU	X
13	Žatec	201	KATU	KATU, KOSE	X

## L.5 Solární termické kolektory a jejich parametry v Rapoticích

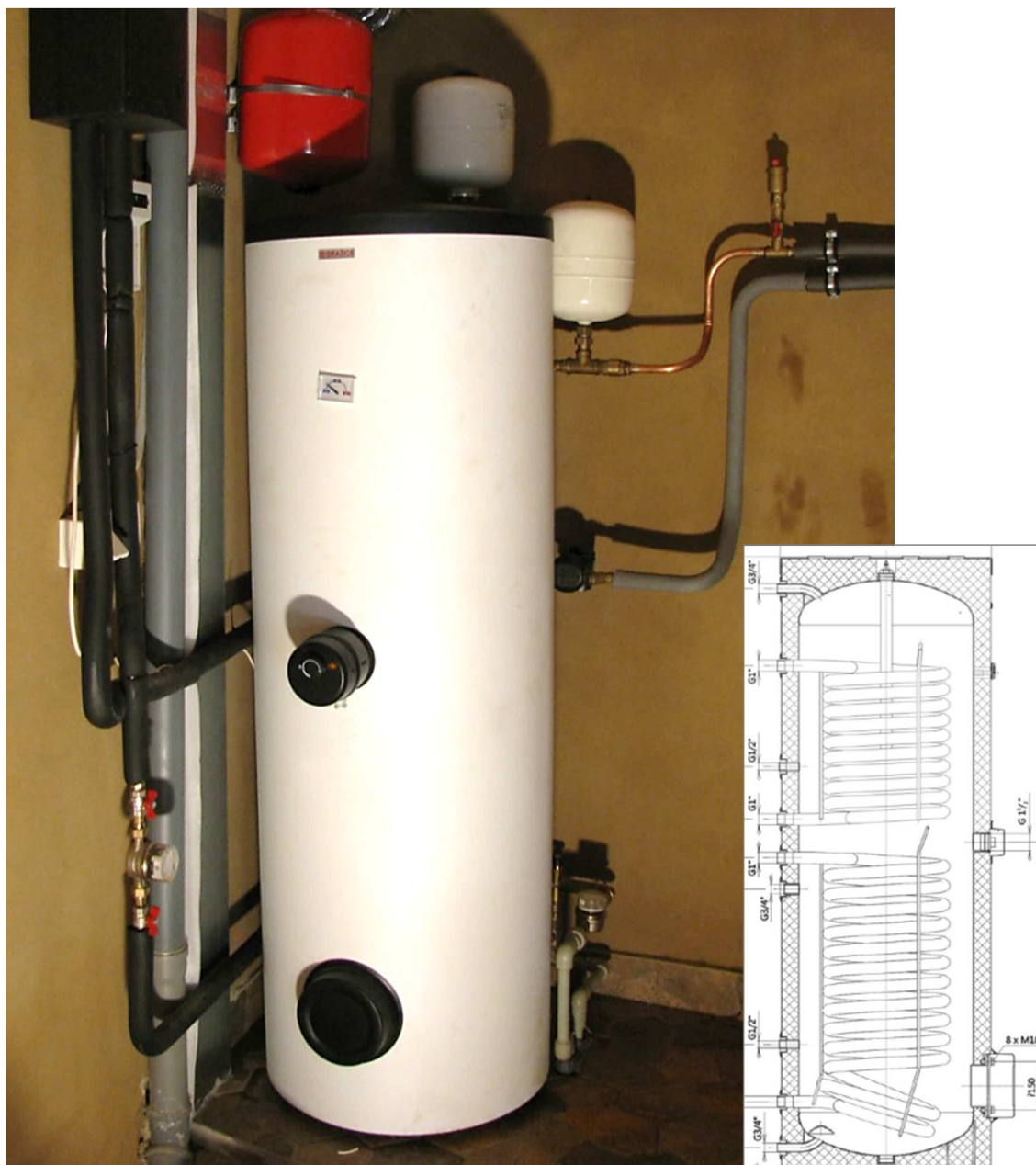


Obr. 50 - Solární termické kolektory SK 218 Freesun (foto autora)

Tab. 29 - Technické parametry kolektorů SK 218 (Solární kolektor, 2018)

#	Parametr	Jednotky
1	Rozměr	2095 x 1100 x 105 mm
2	Absorbér (BlueTec)	Celoměděnný se selektivním povrchem, tl. 0,2 mm ( $\alpha = 0,95, \epsilon = 0,05$ )
3	Plocha absorbéru	2,018 m <sup>2</sup>
4	Trubkový registr	Typ lyra
5	Rám	ABS UV a Al
6	Izolace	MW - 40 mm dno s Al a 20 mm boky s Al
7	Hmotnost	48 kg
8	Zasklení	Kalené sklo - 4 mm
9	Optická účinnost	79 %
10	Lineární součinitel tepelné ztráty	$a_1 = 3,720 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
11	Kvadratický součinitel tepelné ztráty	$a_2 = 0,007 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
12	Pracovní teplota	do 100 °C
13	Doporučený pracovní tlak	600 kPa
14	Celkový obsah kapaliny	1 litr
15	Průtočné množství kapaliny	30 - 400 l·hod <sup>-1</sup>
16	Max. teplota povrchu absorbéru bez chlazení	220 °C

## L.6 Solární akumulční zásobník v Rapoticích



Obr. 51 - Solární akumulční zásobník OKC 300 NTRR/SOL

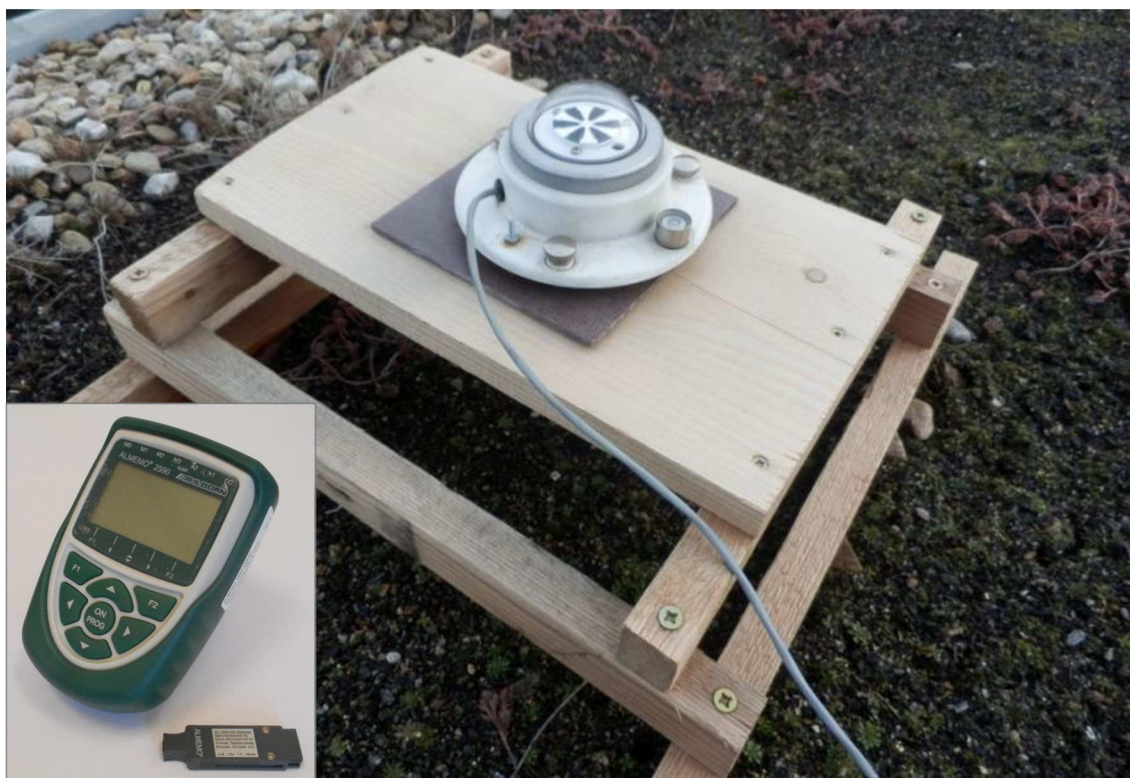
Tab. 30 - Technické parametry zásobníku OKC 300 NTRR/SOL (Dražice, 2018)

#	Parametr	Jednotky
1	Objem zásobníku	275 l
2	Průměr / výška zásobníku	597 / 1790 mm
3	Plocha spodního trubkového výměníku	1,5 m <sup>2</sup>
4	Objem spodního výměníku	10,5 l
5	Plocha horního trubkového výměníku	1,0 m <sup>2</sup>
6	Objem horního výměníku	7,0 l
7	Maximální teplota teplé vody	90 °C
9	Tepelná izolace	PUR tl. 50 mm

## L.7 Měřicí technika klimatických parametrů v Rapoticích



Obr. 52 - Meteostanice WH1080 (foto autora; Meteostanice, 2018)



Obr. 53 - Pyranometr FLA628S na měření globálního ozáření a datalogger Almemo 2590-4S s externí pamětí SD pro záznam měření pyranometru (foto autora)

## L.8 Postup výpočtu popisovaných separačních modelů difúzního záření

### Reindl1 (Reindl, 1990)

$$\begin{aligned} \text{Interval: } & 0 \leq k_t \leq 0,3 & \text{Omezení: } & I_d/I \leq 1,0 \\ I_d/I = & 1,000 - 0,232 \cdot k_t + 0,0239 \cdot \sin(\alpha) - 0,000682 \cdot T_a + 0,0195 \cdot \phi \end{aligned} \quad \text{R.18}$$

$$\begin{aligned} \text{Interval: } & 0,3 < k_t < 0,78 & \text{Omezení: } & 0,1 \leq I_d/I \leq 0,97 \\ I_d/I = & 1,329 - 1,716 \cdot k_t + 0,267 \cdot \sin(\alpha) - 0,00357 \cdot T_a + 0,106 \cdot \phi \end{aligned} \quad \text{R.19}$$

$$\begin{aligned} \text{Interval: } & 0,78 \leq k_t & \text{Omezení: } & 0,1 \leq I_d/I \\ I_d/I = & 0,426 \cdot k_t - 0,256 \cdot \sin(\alpha) + 0,00349 \cdot T_a + 0,0734 \cdot \phi \end{aligned} \quad \text{R.20}$$

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,000 - 0,232 \cdot k_t + 0,0239 \cdot \sin(\alpha) - 0,000682 \cdot T_a + 0,0195 \cdot \phi \\ 1,329 - 1,716 \cdot k_t + 0,267 \cdot \sin(\alpha) - 0,00357 \cdot T_a + 0,106 \cdot \phi \\ 0,426 \cdot k_t - 0,256 \cdot \sin(\alpha) + 0,00349 \cdot T_a + 0,0734 \cdot \phi \end{cases}$$

### Reindl2 (Reindl, 1990)

Upravená verze separačního modelu v případě, že nejsou dostupné data o venkovní teplotě a relativní vlhkosti vzduchu.

$$\begin{aligned} \text{Interval: } & 0 \leq k_t \leq 0,3 & \text{Omezení: } & I_d/I \leq 1,0 \\ I_d/I = & 1,020 - 0,254 \cdot k_t + 0,0123 \cdot \sin(\alpha) \end{aligned} \quad \text{R.21}$$

$$\begin{aligned} \text{Interval: } & 0,3 < k_t < 0,78 & \text{Omezení: } & 0,1 \leq I_d/I \leq 0,97 \\ I_d/I = & 1,400 - 1,749 \cdot k_t + 0,177 \cdot \sin(\alpha) \end{aligned} \quad \text{R.22}$$

$$\begin{aligned} \text{Interval: } & 0,78 \leq k_t & \text{Omezení: } & 0,1 \leq I_d/I \\ I_d/I = & 0,489 \cdot k_t - 0,182 \cdot \sin(\alpha) \end{aligned} \quad \text{R.23}$$

Kde	$k_t$	Index jasnosti/propustnost atmosféry (clearness index), [-]
	$I$	Globální sluneční ozáření, [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
	$I_d$	Difúzní slunečné ozáření, [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
	$\alpha$	výška slunce nad obzorem, [°]
	$T_a$	venkovní teplota vzduchu, [°C]
	$\phi$	Relativní vlhkost vzduchu, [-]



### BRL (Ridley, 2010)

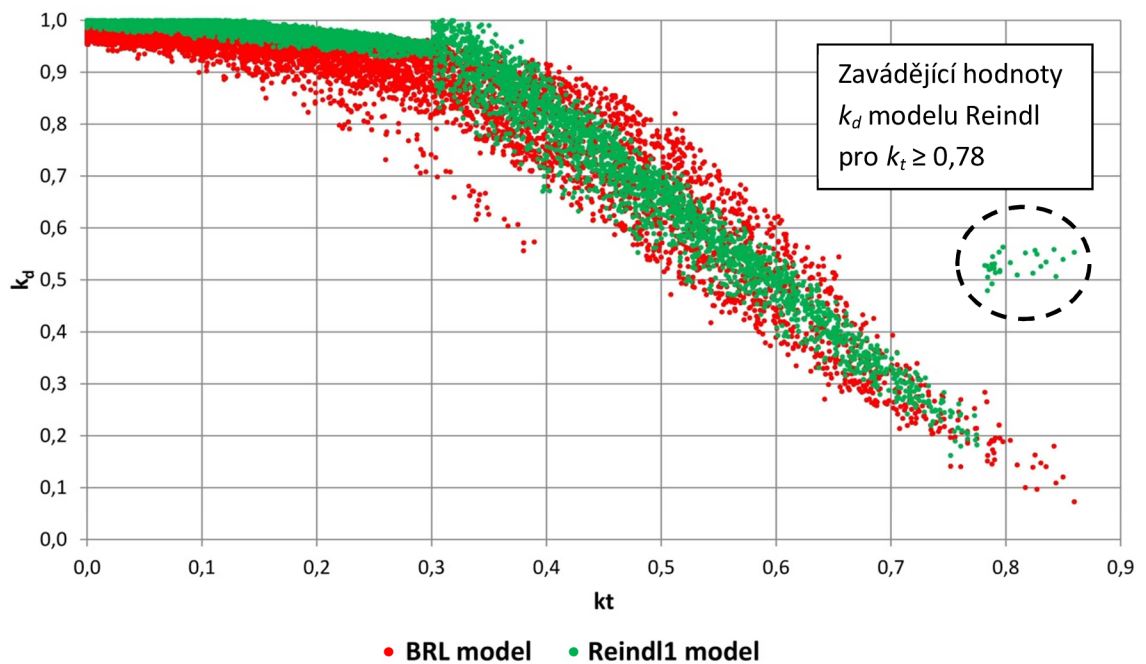
$$\frac{I_d}{I} = \frac{1}{1 + e^{-5,38 + 6,63 \cdot k_t + 0,006 \cdot AST - 0,007 \cdot \alpha + 1,75 \cdot K_t + 1,31 \cdot \psi}} \quad \text{R.24}$$

Proměnná variability  $\psi$

$$\psi = \begin{cases} \frac{k_{t-1} + k_{t+1}}{2} & \text{východ slunce} < t < \text{západ slunce} \\ k_{t+1} & t = \text{východ slunce} \\ k_{t-1} & t = \text{západ slunce} \end{cases} \quad \text{R.25}$$

- Kde
- $AST$  Zdánlivý sluneční čas, [hh:mm]
  - $K_t$  Denní Index jasnosti/propustnost atmosféry, [-]
  - $\psi$  Proměnná variability, [-]

### L.9 Porovnání závislostí $k_d$ na $k_t$ u modelů BRL a Reindl1



Obr. 54 - Porovnání modelů BRL a Reindl1