

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

**SIMULAČNÍ ANALÝZA SYSTÉMU
CENTRÁLNÍHO ZÁSOBOVÁNÍ TEPEM:
SCÉNÁŘE PRO MODERNIZACI**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Slavík** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **467295**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav techniky prostředí**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Technika životního prostředí**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Simulační analýza systému centrálního zásobování teplem: scénáře pro modernizaci

Název diplomové práce anglicky:

Simulation Analysis of a District Heating System: Modernization Scenarios

Pokyny pro vypracování:

Práce se zabývá simulačním posouzením příkladového systému centrálního zásobování teplem. Student má za úkol shmout současný stav centrálního zásobování teplem (CZT) v ČR a také současné trendy modernizace známé ze zahraničí. Na základě této rešerše budou stanoveny základní předpoklady pro modernizaci příkladového CZT systému zpracované do několika scénářů. Pro tyto scénáře bude vyhodnocena energetická náročnost studovaného CZT pomocí simulačních metod (konkrétně TRNSYS). Součástí praktické části je vývoj energetického modelu příkladového systému CZT a simulační analýza energetické náročnosti systému pro nadefinované scénáře.

Seznam doporučené literatury:

H. Lund et al., "The status of 4th generation district heating: Research and results," Energy, vol. 164. Elsevier Ltd, pp. 147–159, Dec. 01, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.08.206.
D. Connolly et al., "Heat Roadmap Europe: Combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system," Energy Policy, vol. 65, pp. 475–489, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2013.10.035.
J. L. M. Hensen and R. Lamberts, Building performance simulation for design and operation, Abingdon. Spon Press, 2011.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Vojtěch Zavřel, Ph.D., ústav techniky prostředí FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **27.10.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **06.01.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Vojtěch Zavřel, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Souhrn

Diplomová práce se zabývá simulační analýzou příkladového systému centrálního zásobování teplem (CZT). Pro příkladový systém jsou navrženy scénáře modernizace, které vychází ze současných trendů v CZT známých ze zahraničí. Analýza je provedena s využitím simulačního nástroje TRNSYS, kde jsou sestaveny dílčí numerické modely reprezentující navrhované modernizační scénáře. Jsou vyhodnoceny dopady úsporných opatření a modernizace systému CZT pomocí indikátorů energetické náročnosti a produkce ekvivalentních emisí CO₂.

Summary

The diploma thesis deals with simulation – based analysis of an example district heating system (DHS). For the example DHS, modernization scenarios referring the current trends known from abroad are proposed. The simulation – based analysis is performed using the simulation tool TRNSYS, where numerical sub – models representing the proposed modernization scenarios are built. The impacts of various energy efficiency measures and other DHS modernization actions are evaluated using key performance indicators such as energy performance and related production of equivalent CO₂ emissions.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Simulační analýza systému centrálního zásobování teplem: scénáře pro modernizaci“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vojtěcha Zavřela Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne 6. 1. 2022.

Bc. Adam Slavík

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Vojtěchu Zavřelovi Ph.D. za vstřícný přístup, ochotu, užitečné rady, připomínky a konzultace, které mi pomáhaly při vypracování této práce. Dále bych rád poděkoval všem členům své rodiny za poskytnutou podporu a klidné zázemí během celého studia na vysoké škole.

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	8
Seznam použitých zkratk.....	8
1. Úvod.....	9
2. Možnosti modernizace CZT v rámci ČR.....	11
2.1 Stávající stav v ČR.....	11
2.2 Spotřeba tepla	15
2.3 Snížení provozních teplot.....	20
2.4 Požadavky na VYT a TUV.....	22
2.5 Elektrifikace CZT pomocí tepelných čerpadel	27
2.5.1 Tepelná čerpadla.....	28
2.5.2 Skladování tepelné energie	32
3. Metodika pro vyhodnocení modernizace CZT.....	34
3.1 Popis studovaného případu CZT.....	34
3.2 Návrh modernizačních scénářů.....	35
3.3 Volba simulačního nástroje	37
3.4 Volba klíčových indikátorů	39
4. Vývoj numerického modelu	40
4.1 Základní komponenty modelu v prostředí TRNSYS	40
4.1.1 Primární okruh.....	41
4.1.2 Sekundární okruh.....	43
4.1.3 Spotřebitelský okruh.....	45
4.2 Okrajové podmínky.....	47
4.3 Konvenční CZT (1.scénář)	50
4.4 CZT s progresivním úsporným opatřením (2. scénář)	52
4.5 Částečně/plně elektrifikované CZT s progresivním úsporným opatřením (3. a 4. scénář).....	55

5. Ověření kvality modelu	60
5.1 Tepelný výkon na vytápění budovy	60
5.2 Teplotní spády a žádaná teplota v budově.....	61
5.3 Kontrola provozu tepelného čerpadla	64
6. Výsledky a vyhodnocení.....	65
6.1 Konvenční CZT (1.scénář)	65
6.2 CZT s progresivním úsporným opatřením (2. scénář)	67
6.3 Částečně/plně elektrifikované CZT s progresivním úsporným opatřením (3. a 4. scénář).....	69
6.4 Celkové vyhodnocení	71
7. Diskuse.....	74
8. Závěr	77
Použitá literatura	79
Přílohy	87

Seznam použitých symbolů

k	počet osob v budově	[-]
Q_i	vnitřní zisky	[kWh]
t	časový úsek	[hod]
t_{ambient}	venkovní teplota	[°C]
t_{setpoint}	žádaná teplota v zóně	[°C]

Seznam použitých zkratk

CZT	centrální zásobování teplem
COP	topný faktor
ERÚ	energetický regulační úřad
KVET	kombinovaná výroba elektřiny a tepla
KPI	klíčový indikátor
OZE	obnovitelné zdroje energie
SCZT	soustava centrálního zásobování teplem
TČ	tepelné čerpadlo
TUV	teplá užitková voda
TRNSYS	Transient System Simulation Tool

1. Úvod

Tato práce se zabývá posouzením příkladového systému CZT pro skupinu rezidenčních budov. Pozornost je zaměřena na dopady úsporných opatření a modernizace systému CZT v rámci energetické náročnosti a produkce uhlíkových emisí, resp. ekvivalentních emisí CO₂.

Zaměření této práce je motivováno snahou EU zmírnit dopady globálního oteplování a reaguje na požadavky „Zelené Dohody“. Členské státy EU se zavazují ke společnému cíli dosáhnout snížení celkových emisí skleníkových plynů ve srovnání s rokem 1990 nejméně o 55 % do roku 2030 a o 80 % až 90 % do roku 2050 [1].

Na účely vytápění a chlazení se využívá skoro 50 % konečné poptávky po energii v EU. Až 80 % z této energie je spotřebováno v budovách. Sektor budov je v součtu zodpovědný za 35 % celkových vyprodukovaných emisí CO₂. Velké množství produkovaných emisí vychází ze skutečnosti, že většina budov v EU je vysoce energeticky náročná a dodávky tepla na vytápění a chlazení jsou převážně založené na využívání fosilních paliv.

Důležitou roli v dodávkách tepla hrají soustavy centrálního zásobování teplem (SCZT). Aktuálně SCZT v EU pokrývají 13 % potřeb tepla na vytápění. Jednou z obecných výhod centrálního zásobování teplem oproti decentrálnímu zásobování je vysoká energetická účinnost zdrojů tepla, díky svému konstrukčnímu řešení nižší produkce škodlivin, podpoře integrace OZE a možnosti využívání nízkopotenciálních zdrojů tepla a sezónních akumulčních zásobníků tepla [3].

V ČR jsou SCZT poměrně rozsáhlé. Dominujícími palivy využívanými v centrálních zdrojích (výtopny a teplárny) na výrobu tepla jsou uhlí, plyn a jiné ropné produkty. V současné době tuzemské teplárenství čelí nežádoucímu trendu odpojování zákazníků od centrálních dodávek tepla a zániku některých soustav CZT. Příčinou jsou striktní emisní limity, drahé emisní povolenky a klesající poptávka po teple. Všechny tyto aspekty se promítají do konečné částky za jednotku dodaného tepla. Tepelný sektor stojí před rozsáhlou dekarbonizací s cílem naplnit stanovené klimaticko – energetické cíle v rámci EU. Soustavy CZT mohou do budoucna pomoci vybudovat nízkoemisivní a udržitelný energetický systém. Je proto důležité zabývat se možnostmi modernizace systémů CZT a budovat nebo rozšiřovat jejich aplikace.

V rešeršní části práce je shrnut současný stav CZT v ČR a dále jsou popsány současné trendy ve vývoji a modernizaci systémů CZT známé ze zahraničí. Následuje metodická část, kde je představen postup pro řešení zadaného problému. Je definován studovaný systém CZT a jsou představeny návrhové scénáře modernizace studovaného systému. Návrh scénářů a dílčích parametrů vychází z rešeršní části práce. Dále jsou v této kapitole uvedeny použité klíčové indikátory pro vyhodnocení a porovnání vlivu opatření v jednotlivých scénářích.

SCZT jsou poměrně komplexní a složité systémy, které není snadné analyzovat pomocí konvenčních metod. Pro vyhodnocení energetické náročnosti a ekologičnosti provozu bylo použito nástrojů pro dynamické energetické simulace.

Praktická část uvádí tvorbu simulačního modelu. Jsou uvedena nastavení a hlavní parametry dílčích prvků modelu pro jednotlivé scénáře. Pro zvolené okrajové podmínky je provedeno vyhodnocení simulační analýzy.

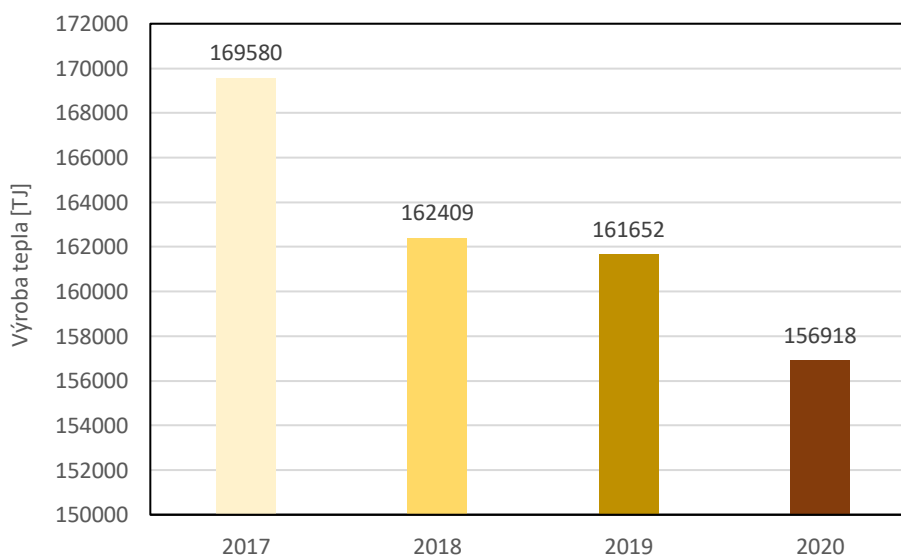
2. Možnosti modernizace CZT v rámci ČR

2.1 Stávající stav v ČR

Soustavy centrálního zásobování teplem (SCZT) jsou na území ČR velmi rozsáhlé. V současné době je na síť centrálního zásobování teplem (CZT) napojeno přes 40 % všech domácností. SCZT zásobují přibližně 70 % všech bytů v bytových domech. Nynější infrastruktura zahrnuje více než 2000 licencovaných provozoven tepla [3]. Součet délek tepelných sítí (parovody, horkovody, teplovody) činí okolo 7 500 km [4]. Oblasti, které SCZT zásobují teplem dělíme obecně na tři sektory (domácnosti, průmysl a služby). Z dat publikovaných Energetickým regulačním úřadem (ERÚ) v roce 2020 vychází, že z celkové výroby tepla centrálními soustavami (teplárny a výtopny) 40 % pojmu domácnosti, 30 % je využito v průmyslu a 25 % ve službách, zdravotnictví, školství apod.

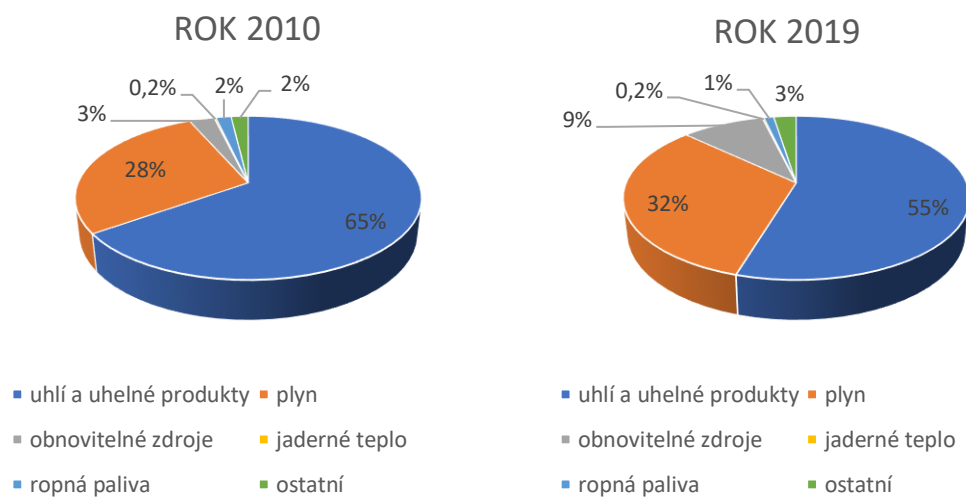
Za rok 2020 bylo celkově vyrobeno 156 917 TJ tepla brutto. Brutto teplo je vyrobené teplo, které nezahrnuje teplo použité na výrobu elektřiny. Dodávky tepla (množství tepelné energie dodané do SCZT) činily 85 928 TJ což odpovídá zhruba 55 % celkové výroby tepla brutto. Zbytek tepla byl spotřebován ve vlastních závodech, podnicích a ztracen v rozvodech tepelných sítí.

Porovnáním dat výroby tepla z let 2017 až 2020 (viz Graf 1), je vidět klesající trend celkové výroby tepla, který činí 12 662 TJ . Výroba tepla tak klesla v rozmezí 4 let o necelých 8 %.



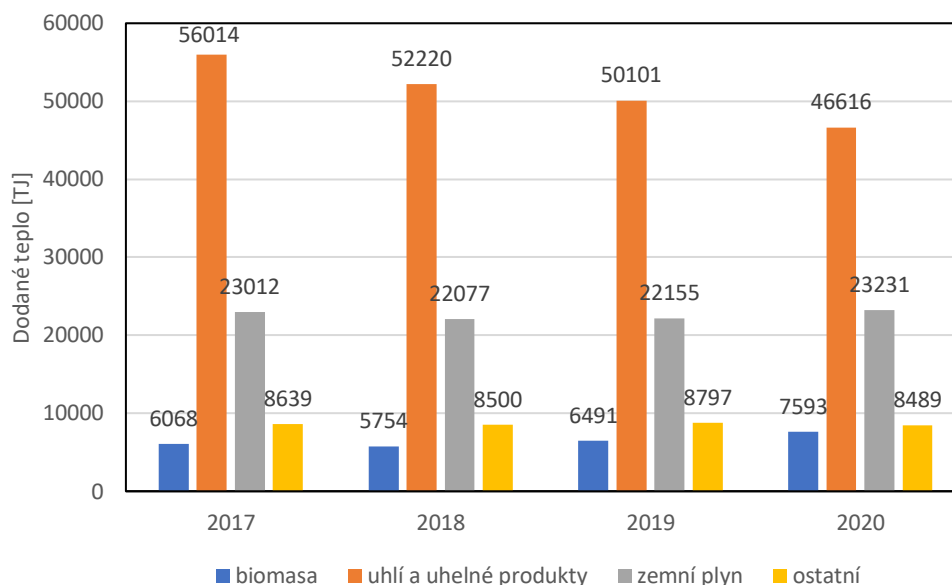
Graf 1 Celková výroba tepla soustavami CZT za rok 2017 až 2020 - vytvořeno z [5]

Graf 2 zobrazuje procentuální zastoupení zdrojů paliv na výrobu tepla v roce 2010 a 2019. U výroby tepla z uhlí a jeho produktů, které jsou dominantním palivem v českém teplárenství a podílí se na více než 50 % na celkové výrobě tepla pro SCZT, můžeme vidět klesající trend, který meziročně činí okolo 2 %. Zemní plyn, který je druhým nejčastěji využívaným palivem si přibližně drží své procentuální zastoupení a spíše stagnuje. Veliký nárůst zaznamenávají obnovitelné zdroje energie (OZE), jejich podíl na výrobě tepla ztrojnásobil. Kategorie „ostatní“ reprezentuje méně zástoupená paliva na výrobu tepla a energie přeměněné na teplo (elektrická energie, energie Slunce, odpadní teplo, apod.)



Graf 2 Poměrné zastoupení zdrojů na výrobu tepla – vytvořeno z [5]

Na Grafu 3 je vidět srovnání konkrétních dat dodávek tepla soustavami CZT v letech 2017 až 2020 podle jednotlivých paliv. Dodané teplo z uhlí a uhelných produktů kleslo o více než 15 % za uplynulé 4 roky. U zemního plynu nedošlo k významnému nárůstu či poklesu. K velikému nárůstu, téměř o 20 %, došlo u biomasy [5].



Graf 3 Dodávka tepla podle paliv v roce 2017 až 2020 – vytvořeno z [5]

SCZT v současné době prochází mnoha změnami a musí čelit řadě problémů. Jedním z nich jsou rostoucí ceny emisních povolenek. Jejich cena v roce 2021 přesáhla hodnotu 50 Euro za jednotku. Pro porovnání, v roce 2017 se ceny pohybovaly okolo 5 až 7 euro za jednotku [6]. Důležitým faktem je dále dlouhodobě se snižující poptávka po tepelné energii. Dochází k útlumu těžkého průmyslu, budovy se modernizují (zateplení, výměna oken apod.). Spotřeba tepla také významně klesá vlivem změn klimatu. Průměrná venkovní teplota vzduchu převažující v otopné sezóně v roce 2019 je o 1,4 °C vyšší v porovnání s dlouhodobým normálem z let 1981–2010 [4]. Ze zprávy o vývoji energetiky za rok 2019 publikované Ministerstvem průmyslu a obchodu, vychází, že se za posledních deset let eviduje pokles spotřeby tepelné energie v rezidenčním sektoru o 22 %. Výše zmíněná fakta se projevují do konečných cen za jednotku tepla, které musí koncoví zákazníci zaplatit. Rostoucí ceny za dodané teplo mají za následek odpojování některých zákazníků od sítí CZT. Odpojování se týká zejména bytových domů. Častým důvodem pro osamostatnění od CZT je také nezávislost a možnost vytápění i mimo otopnou sezónu. SCZT v létě zajišťují pouze dodávku teplé užitkové vody (TUV). Tato skutečnost vyvolává u některých zákazníků jistý pocit diskomfortu. Bytové domy nebo celé územní celky pak volí decentrální způsob dodávky tepla. Nejčastěji jsou těmito zdroji vlastní plynové kotelny nebo tepelná čerpadla. Odpojování od SCZT přispívá k dalšímu nárůstu cen za teplo [7].

V ČR je momentálně ohrožen provoz a existencionální přežití u desítek menších provozoven CZT. Obecně je potřeba urychlit dekarbonizaci těchto provozoven, jinak nebudou schopny splnit striktní emisní limity do roku 2023. Z důvodů zmíněné hrozby a dále s cílem dosažení klimatických cílů do budoucnosti podepsaly Český teplárenský svaz (ČPS) a Teplárenské sdružení ČR (TSČR) Memorandum o spolupráci na dekarbonizaci českého teplárenství [8].

Tuzemské teplárenství stojí před rozsáhlou transformací výroby tepla (paliva, zdroje, modernizace tep. sítí apod.) za účelem splnění emisních restrikcí a dále naplnění klimaticko – energetických cílů stanovených EU. Jedná se zejména o přechod z konvenčních zdrojů paliv, tj. z uhlí na nízkouhlíkové a udržitelné zdroje (zemní plyn, OZE, biomasa, odpadní teplo, teplo okolí atd.) [3]. Již zmíněný současný procentuální podíl uhlí (50 %) na celkové výrobě tepla je neudržitelný. Uhlí musí být postupně nahrazeno. V následujícím desetiletí se předpokládá, že se zemní plyn bude podílet nejméně z 50 % (proti současným 32 %) na celkové výrobě tepla. Aktuální emise by se rychle snížily o 40 až 50 %. Zemní plyn by měl být ale jen dočasným řešením. Stejně jako uhlí patří zemní plyn mezi fosilní paliva a vykazuje emise. Nicméně předpověď je taková, že bez zemního plynu se české teplárenství v blízké budoucnosti neobejde a ten se bude z velké části nadále podílet na výrobě tepla .

Alternativou jak pomoci nahradit uhlí je také využití **biomasy**. Zájem o ni a její využití v poslední době značně roste, avšak jen u menších provozoven CZT, neboť doprava a hlavně zásobování větších celků biomasou jsou obtížné.

Další možností náhrady uhlí je **odpadní teplo** , které se u nás zatím využívá jen zřídka. Odpadní teplo stejně jako biomasa je vhodné pro využití a zajištění dodávky tepla pro méně rozsáhlé územní celky.

Neméně důležitým řešením náhrady stávajících paliv na výrobu tepla jsou syntetická paliva, které se získávají elektrolýzou. Syntetická paliva dokážou, nejen v teplárenství, plnohodnotně zastoupit fosilní paliva [9].

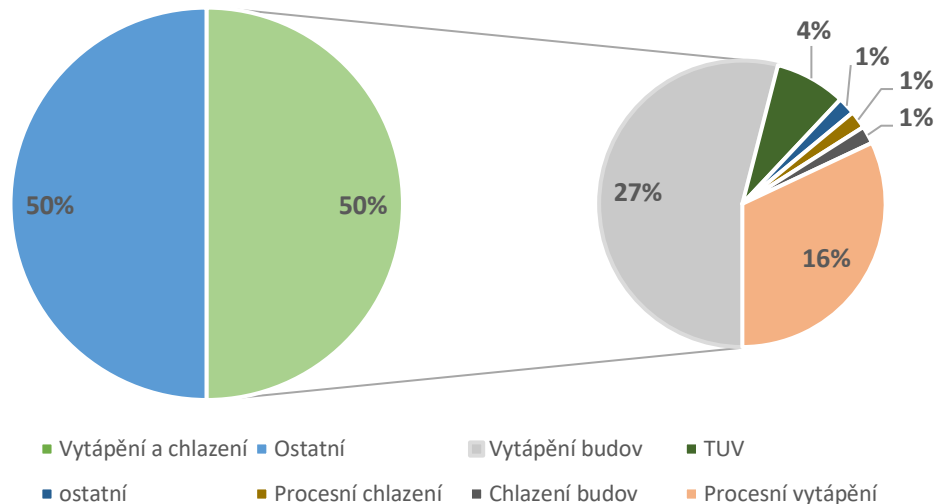
Dále bude pozornost významně soustředěna na rozšiřování aplikací OZE a účinnou kombinovanou výrobu elektřiny a tepla (KVET) v teplárnách. Aktuální podíl tepláren na výrobě tepla pro SCZT je více než 70 %. Transformace musí zohlednit očekávaný rozvoj OZE (větrná, sluneční energie apod.) a plánovanou elektrifikaci celého energetického odvětví.

Transformace tepelného sektoru se netýká pouze změn paliv a zdrojů na výrobu tepla. Je důležité nahlížet na problematiku soustav CZT jako na komplexní celek. Je na místě zpracovat podrobnou analýzu rozsáhlých stávajících sítí CZT a vyhodnotit jejich energetický potenciál a ekonomickou udržitelnost. Při podepisování Memoranda se hlavně řešila situace rozpadajících sítí CZT. Prioritou bude udržet v provozu již vybudované sítě případně je zmodernizovat a zároveň investovat a budovat nové [8]. V rámci EU jsou SCZT chápány jako klíčový nástroj k dosažení nízkoemisních a cenově dostupných dodávek tepla pro rezidenční sektor. Rušení rozsáhlých a již vybudovaných sítí CZT a jejich nahrazení decentrálními a méně účinnými systémy, lze chápat jako promarnění příležitosti a potenciálu k dosažení stanovených cílů klimatického hospodářství (zejména snížení emisí skleníkových plynů) [6].

ČR svým podpisem pod „Pařížskou dohodu o klimatu“ přijala závazek ohledně snížení emisí o 30 % do roku 2030 v porovnání s rokem 2005. Snížení o 30 % by znamenalo snížení emisí přibližně o 44 miliónů tun CO₂ekv. [10]. Lupíšek [11] ve své studii uvádí, že v roce 2016 byl rezidenční sektor budov odpovědný za více než 22 % celkových emisí skleníkových plynů (CO₂) v ČR. Současný stav je takový, že ČR doposud nestanovila jasné cíle v oblasti teplotnictví a neexistuje konkrétní strategie pro nízkouhlíkovou transformaci.

2.2 Spotřeba tepla

Budovy svou energetickou náročností (energie na vytápění, chlazení, příprava TUV, domácí spotřebiče apod.) způsobují značné množství emisí skleníkových plynů. V EU je konkrétně sektor budov v součtu zodpovědný za 36 % celkových emisí [12]. Celková energie na vytápění a chlazení v EU odpovídá přibližně polovině její celkové spotřeby. Na Grafu 4 je vidět, kolik procent celkové spotřeby energie tvoří vytápění, chlazení a příprava TUV v budovách. Jen pro představu celková spotřeba energie celé EU za rok 2017 byla přibližně 12 700 TWh. Na rezidenční sektor připadalo 2850 TWh [13].



Graf 4 Procentuální rozdělení celkové spotřeby energie v EU – upraveno z [13]

Odhaduje se, že v Evropě žije přes 73 % populace v městských oblastech. Údaje z „Buildings Performance Institute Europe“ ukazují, že 40 % bytových domů bylo postaveno před rokem 1960 a 97 % z nich potřebuje zrekonstruovat a zmodernizovat [14].

V ČR je aktuálně více než 211 000 bytových domů (více než 2 400 000 bytů). Přibližně tři čtvrtiny stávajících bytových domů byly postaveny před rokem 1980. Z průzkumu rezidenčních budov vychází na základě odborných statistik, že je zrekonstruováno přibližně 40 % z celkového počtu bytových domů. Zbývající bytové domy nadále vykazují vysokou energetickou náročnost a jsou leckdy ve velmi špatném stavu [15].

Obecně se energetické náročnosti bytových domů po dlouhá desetiletí nevěnovala příliš velká pozornost. Rezidenční sektor hraje důležitou roli v celkové energetické bilanci spotřeby tepla a je důležité hledat a zabývat se možnými způsoby úspor energií v tomto sektoru. Snížení energetické náročnosti budov v tak velkém měřítku může přinést veliké úspory energií.







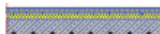








V ČR existují určité standardy budov (bytových domů), které na základě technických kritérií hodnotí energetickou náročnost budov. Jedním z těchto kritérií je hodnocení tepelně technického stavu konstrukcí budovy pomocí součinitele prostupu tepla U ($W/m^2 \cdot K$). Hodnotí prostup tepla stavebními konstrukcemi [16]. Čím menší hodnotu U daná konstrukce má, tím má menší tepelnou ztrátu a tím lze docílit větších úspor energie na vytápění. Významného snížení součinitele prostupu tepla lze docílit

zaizolováním (zateplením) obvodového pláště, stěnových, střešních, stropních a podlahových konstrukcí. Vhodně navrženým typem a tloušťkou tepelné izolace (nejčastěji 100, 150, 200 mm) a její správnou montáží lze hodnoty U až řádově snížit.

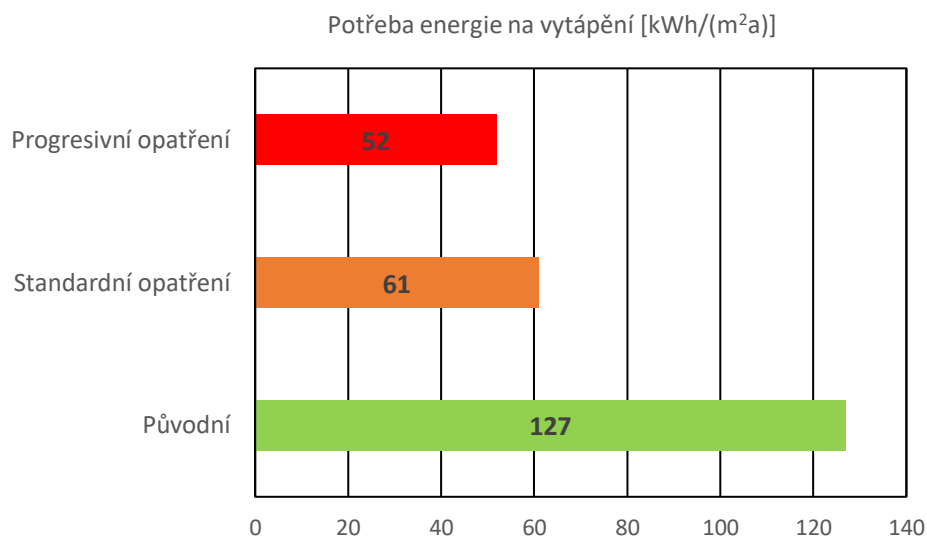
U většiny případů je izolování obálky bytových domů doprovázeno i výměnou oken. Výplně stavebních otvorů (okna, dveře) jsou nejslabšími články obálky budovy z hlediska tepelných ztrát. Stará okna bývají velmi netěsná a jejich tepelně technické vlastnosti nesplňují dnešní standardy.

Tab. 1 ukazuje složení a tepelně – technické vlastnosti konstrukcí a výplní otvorů typického bytového domu s rokem výstavby v letech 1960–1980. Z tabulky je zřejmé srovnání součinitele prostupu tepla **před rekonstrukcí, po standardním úsporném řešení a po progresivním úsporném řešení.**

Tab. 1 Hodnoty U jednotlivých stavebních prvků bytového domu [17]

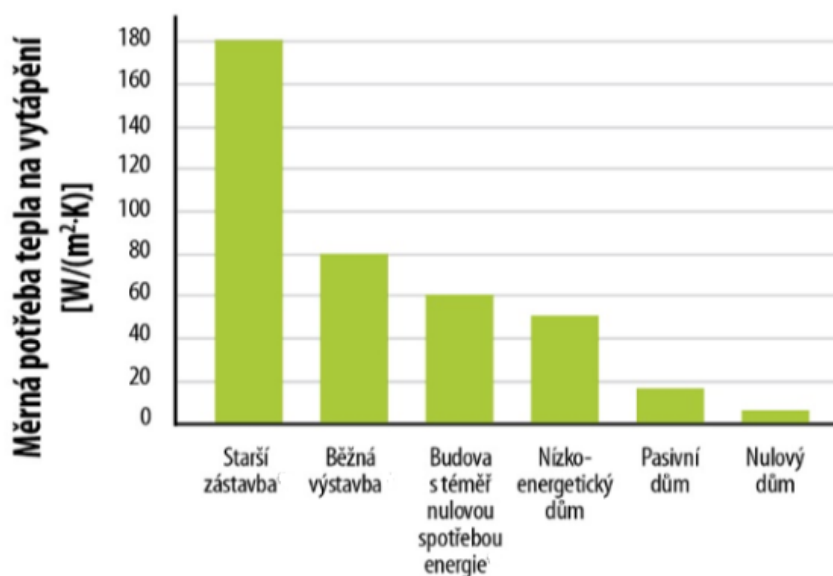
SKLADBA PRVKŮ			
Prvek	Původní	Standardní opatření	Progresivní opatření
Strop	jednoplášťová plochá střecha	nová hydroizolační vrstva+desky polystyrénu tl.10 cm	nová hydroizolační vrstva+desky polystyrénu tl.16 cm
			
Součinitel prostupu tepla U [W/m^2K]	0.57	0.24	0.17
Stěna	ZB tl 150mm - EPS tl 60mm - ZB tl 50mm	vnější kontaktní zateplení s 12 cm fasádního polystyrenu nebo minerálního vlákna	vnější kontaktní zateplení s 16 cm fasádního polystyrenu nebo minerálního vlákna
			
Součinitel prostupu tepla U [W/m^2K]	0.93	0.22	0.18
Podlaha	železobetonový strop tl. 200 mm nad suterénem	izolace z minerálních vláken tl.5 cm + SDK desky	izolace z minerálních vláken tl.16 cm + SDK desky
			
Součinitel prostupu tepla U [W/m^2K]	0.92	0.43	0.20
Okno	dřevěné okno zdvojené	plastové okno iz dvojsklem	plastové okno iz dvojsklem
			
Součinitel prostupu tepla U [W/m^2K]	2.70	1.10	0.80
Dveře	kovový rám, jednoduché zasklení	dřevěné dveře s iz dvojsklem	dřevěné dveře izolované
			
Součinitel prostupu tepla U [W/m^2K]	6.50	2.60	1.20

Dalším kritériem hodnocení energetické náročnosti budov je měrná potřeba tepla na vytápění. Z Grafu 5 lze vidět jakých úspor energie na vytápění (více než 50 %) je možné u typického bytového domu docílit standardními dostupnými prostředky.



Graf 5 Srovnání potřeby tepla na vytápění pro různé úsporné opatření – upraveno z [17]

Dále pak Graf 6 pro orientaci ukazuje srovnání běžně používaných energetických standardů budov v ČR.

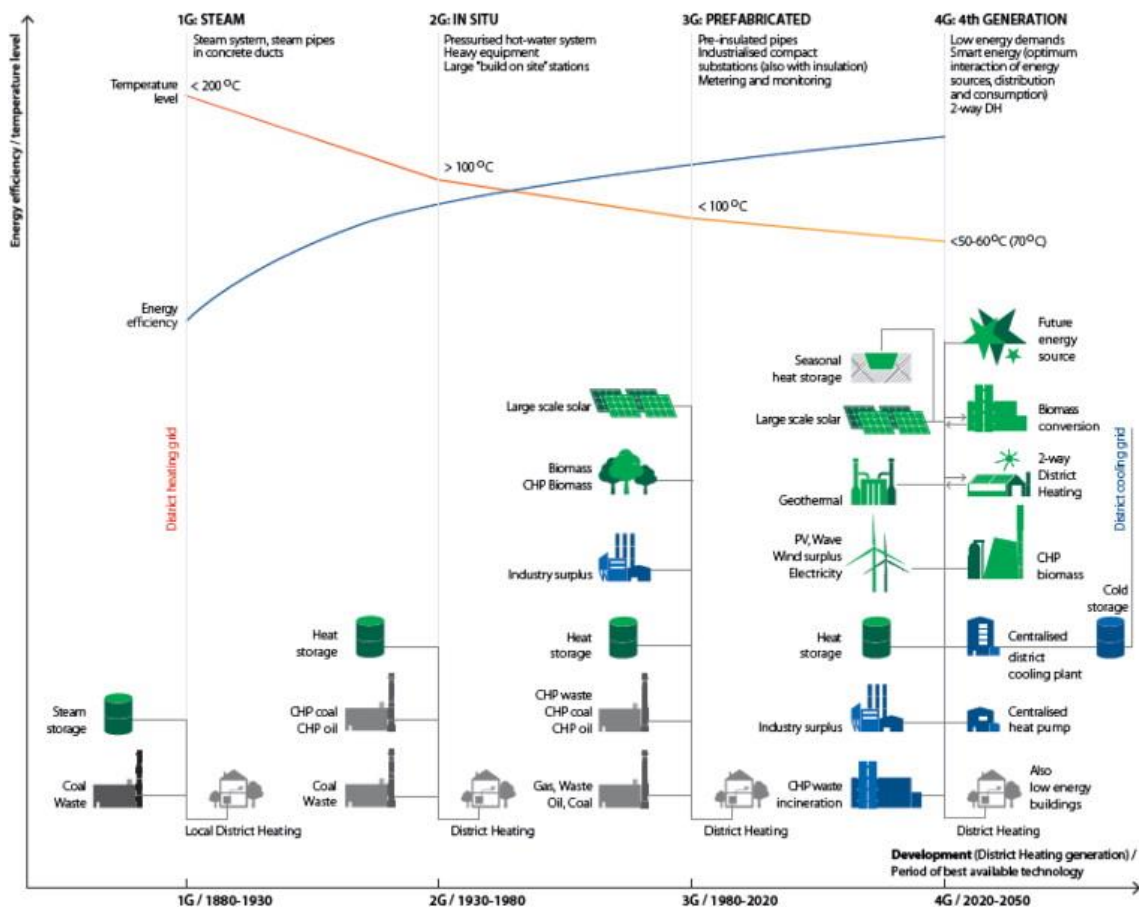


Graf 6 Energetické standardy budov v ČR [18]

Nutno závěrem této kapitoly zmínit, že rekonstrukce budov nepřinese očekávané úspory, nebude-li na problematiku úspor nahlíženo v širším měřítku. Zateplením budovy se sníží tepelná ztráta objektu. Posléze je však nutný přepočít výpočtů původního projektu vytápění (hydraulický výpočet, regulace, výkon otopných těles apod.) Bez řádné kontroly výpočtů a případných změn nebude otopná soustava efektivně pracovat a nebude dosaženo požadovaných úspor [19].

2.3 Snížení provozních teplot

Technické inovace a současné trendy ve vývoji CZT jako snížení energetické náročnosti budov, účinné zdroje tepla, moderní nízkoteplotní způsoby vytápění apod. umožňují pracovat v systémech s nižšími provozními teplotami. Na Obr. 1 je zobrazena časová osa vývoje jednotlivých generací CZT od svého počátku do současnosti a budoucnosti. Z obrázku je zřejmé, že z hlediska historického vývoje se provozní teploty v systémech CZT postupně snižují.



Obr. 1 Vývojové generace CZT [20]

V rámci EU a historického vývoje systémů CZT je zřetelný trend klesajících provozních teplot. Pro původní systémy CZT z **1. generace** byly typické parovody. Využívalo se vysokoteplotní páry o teplotách okolo 200 °C a tlaku až 20 barů. Pára se jevila jako velice výhodná teplonosná látka, protože se v parovodech distribuuje vlastní tlakovou energií. Problémy však byly s vysokými tepelnými ztrátami, kondenzací páry v potrubí, korozí a častými explozemi.

S vývojem techniky v odvětví CZT a vytápěcích systémů se postupně v **2. generaci** CZT přecházelo na vysokotlakou horkou vodu (horkovody) do teplot 160 °C. Hnací silou ve vývoji byla zejména bezpečnost a nižší tepelné ztráty S nižšími teplotami teplotonosné látky se významně zvyšuje účinnost distribuce tepla (nižší tepelné ztráty) a účinnost zdroje. Horká voda oproti páře nabízí možnost využití širší palety zdrojů tepla. Ve velkém měřítku se rozšiřují teplárny vyrábějící současně tepelnou i elektrickou energii. Kombinovanou výrobou dochází ke značným úsporám paliva a zvýšení úrovně kvality ovzduší pro městské oblasti. Objevují se také první akumulční zásobníky tepla.

V 80 a 90. letech 20. století začíná **3. generace** vývoje CZT. Teploty teplotonosné látky nepřesahují teploty 95 °C (teplovody) a instalují se první předizolované potrubí, které vykazují mnohem menší tepelné ztráty než dosud ocelové izolované potrubí v horkovodech a parovodech. Se sníženými teplotami v rozvodech se hojně začínají využívat alternativní zdroje energie (průmyslová tepelná čerpadla, sluneční energie, odpadní teplo apod.) [21].

Moderní koncept nízkoteplotních systémů CZT je typický pro **4. generaci** a předpokládá, že teploty teplotonosné látky se budou pohybovat v rozmezí 50 až 60 (resp. 70) °C v přívodním potrubí a 30 až 25 °C ve vratném potrubí [22].

V Tab. 2 jsou vidět typické provozní parametry a provedení jednotlivých tepelných sítí CZT.

Tab. 2 Druhy tepelných sítí a jejich parametry – upraveno z [23]

Typ sítě:	Parovod	Horkovod	Teplovod
Parametry:			
Výkon soustavy [MW]	20 až 200	50 až 300	2 až 8
Teplota přívodu [°C]	180 až 240	110 až 160	70 až 90
Teplota zpátečky [°C]	40 až 70 (kondenzát)	50 až 80	40 až 60
Konstrukční tlak [MPa]	0,8 až 2,4	1,6 až 2,5	0,4 až 0,6
Provedení sítě	dvoutrubkové, jednorubkové	dvoutrubkové, třítrubkové	čtyřtrubkové, dvoutrubkové
Uložení sítě	podzemní, nadzemní	podzemní, nadzemní	podzemní
Rychlost proudění [m/s]	25 až 60	1 až 2	1 až 2

Nízké provozní teploty jsou hlavním předpokladem pro vybudování účinných systému CZT založené na OZE (zejména geotermální a solární energie) a využívání odpadního tepla. OZE a odpadní teplo jsou převážně nízkoteplotní zdroje tepla a nenajdou své využití u systémů vyžadující vysoké teploty. Provoz vysokoteplotních systémů založených na OZE a využívání odpadního by byl nevhodný, nákladný a neúčinný [24].

Dalším důvodem pro snižování teplot jsou neodmyslitelně tepelné ztráty. Ztráty hrají důležitou roli v celkové účinnosti systémů CZT. Ve výroční zprávě ERÚ za rok 2020 je uvedeno, že tepelné ztráty v ČR tvořily přibližně 8 % z vyrobeného tepla [5]. Tepelné ztráty v potrubí jsou přímo úměrné rozdílu teplot mezi teplonosnou látkou a okolním prostředím (půda, vzduch). Lze je tedy snížit nižšími teplotami teplonosné látky. Li et al. ve své studii [25] uvádí, že je možné snížením teplot přívodní teplonosné látky z 80 °C na 55 °C a předpokladu malých průměrů rozvodného potrubí a kvalitní izolace dosáhnout až 75% snížení tepelných ztrát oproti původnímu stavu. Nižší provozní teploty navíc nevyžadují nákladné investice spojené s celou infrastrukturou rozvodných tepelných sítí. Výše zmíněný nízkoteplotní rozsah provozních teplot (50 až 60 °C) by mohl například umožnit v budoucnu použití plastového potrubí pro tepelnou síť. Plastové potrubí je řádově levnější a klade menší požadavky na provoz a instalaci [26].

Provozní teploty lze snížit pouze za předpokladu zaručení tepelné pohody v budovách. U nových, energeticky méně náročných budov s nízkoteplotními vytápěcími systémy (sálavé vytápění – podlahové, stěnové nebo stropní) žádné riziko nehrozí. Problém nastává u zrekonstruovaných budov s původní otopnou soustavou (otopná tělesa navržená na teplotní spády 85/75 °C, 80/60 °C apod.) [27]. V těchto případech hrozí, že otopná tělesa nebudou schopna poskytnout požadovaný tepelný výkon. Je potřeba nahradit stávající distribuční elementy tepla za nízkoteplotní. Nabízí se možnost tzv. nízkoteplotních otopných těles, dnes běžně dostupných, které jsou navržené na nízké teploty přívodní otopné vody v rozmezí 45 až 55 °C [26].

2.4 Požadavky na VYT a TUV

Hlavním úkolem soustav CZT vedle dodávky tepla na vytápění pro bytové domy je i dodávka tepla na přípravu TUV. Úsporná opatření vedoucí ke snížené energetické náročnosti budovy, na rozdíl od potřeby tepla na vytápění, nemají nikterak veliký dopad na potřebu tepla na přípravu TUV. Ta se odvíjí se zejména od navržených odběrových křivek a chování samotných odběratelů. Potřeba tepla na vytápění se navíc v průběhu roku mění a v přechodových a letních měsících může být až nulová. TUV je však nutné dodávat po celý rok. Jak je již zmíněno v předešlé kapitole, i s nižšími provozními teplotami okolo 50 °C lze za jistých předpokladů zajistit tepelnou pohodu. Takto nízké teploty však mohou způsobit jisté potíže s dodávkami tepla na TUV [28].

Podle normy ČSN EN 06 0320 má mít teplá voda před výtokovou armaturou (před smícháním se studenou vodou) teplotu v rozmezí 50 až 55 °C (v době špičky snížena na teplotu 45 °C). Znamená to, že abychom měli na výtoku teplou vodu o teplotě 55 °C, musíme kvůli tepelným ztrátám v rozvodech dodávat vodu o 2 až 5 °C vyšší tzn. okolo 60 °C. Těchto teplot však v soustavách CZT nové generace navrhovaných na co nejnižší provozní teploty nelze dosáhnout [29].

Navíc u vody o teplotě okolo 50 °C je riziko přítomnosti bakterií *Legionella pneumophila*, která postihuje dýchací cesty lidského organismu. K nákaze pak nejčastěji dochází při koupání (sprchování), kdy vdechujeme infikované aerosoly do plic [30]. Kritické rozmezí teplot, při kterých se bakterie mohou tvořit je 35 až 45 °C [31].

V dnešní době je v bytových domech problém s bakteriemi nejčastěji řešen pomocí tzv. termické dezinfekce. Princip spočívá v zahřátí objemu teplé vody v zásobníku TUV z běžné teploty 55 – 60 °C na více než 70 °C, a to na dobu 3 až 10 minut a následnému zajištění dostatečného průtoku celým systémem. Proces je velmi energeticky náročný a leckdy neproveditelný, navíc není bezpečně zaručeno, že bakterie při zahřátí na vyšší teplotu zcela vyhynou. Jinými způsoby ochrany před bakteriemi je například chemická dezinfekce nebo ionizace vody ionty stříbra nebo mědi [32].

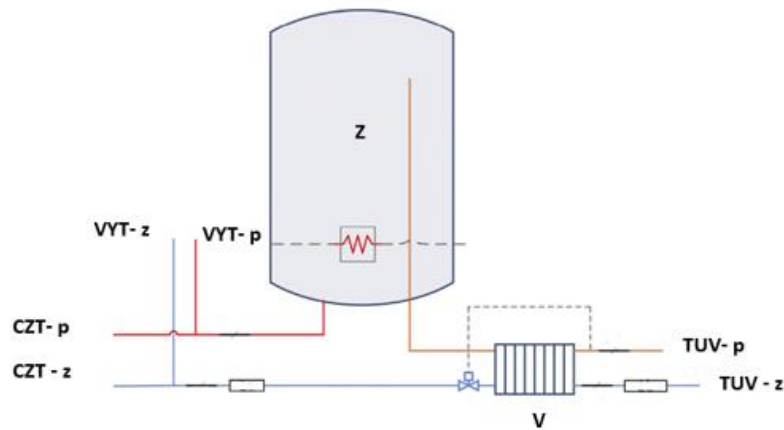
Norma dále stanovuje technický požadavek ohledně maximální doby přípravy TUV (tj. 30 sekund), za kterou musí z výtokové armatury vytékat teplá voda o zmíněné teplotě 50 – 55 °C. V rozlehlých budovách je využíváno tzv. cirkulačního potrubí a cirkulačního čerpadla. Cirkulace zajistí, že i v nejvyšších nebo nejvzdálenějších odběrných místech teplé vody nebude stanovená doba překročena a zároveň bude dosažena minimální teplota na výtoku. U úseků, které nejsou opatřeny cirkulačním potrubím nesmí být překročen maximální objem vody (2 litry pro úseky s umyvadly/dřezy a 3 litry pro úseky s připojením na vany, sprchy apod.) Cirkulační potrubí však poměrně zásadně přispívá k tepelným ztrátám v rozvodech. Alternativou cirkulačního potrubí může být přehřívání pomocí samoregulačního elektrického topného kabelu, který automaticky udržuje požadovanou teplotu vody v potrubí [29].

Na základě výše zmíněné problematiky lze konstatovat, že se nám poměrně zásadně rozcházejí požadavky dodávky tepla na vytápění a přípravu TUV. Provozní teploty CZT nejsou již tolik závislé na požadavcích otopných soustav. S nižšími provozními teplotami roste vliv požadavků na přípravu TUV [28].

Brand se ve svém výzkumu [31] věnuje problematice zajištění dodávek a přípravy TUV v bytových domech bez velkých teplotních výkyvů, časových prodlev a bez rizika tvorby a přítomnosti bakterií Legionella v rámci nízkoteplotních systémů CZT. Moderní systémy CZT s nízkými provozními teplotami lze efektivně spojit s dodávkou a přípravou TUV za předpokladu náhrady stávajících domovních předávacích stanic (samotný výměník a regulační systém). Dnes jsou na trhu vysoce účinné výměníky tepla. Lze docílit rozdílu teplot mezi vstupem na primární straně a výstupem na sekundární straně pouhé 3 °C (oproti běžnému rozdílu okolo 10 °C). Soustavy se navrhuje na teplotní spády 50/25 °C. Znamená to, že na sekundární straně výměníku, tj. spotřebitelském okruhu jsme schopni získat teplou vodu o teplotě 47 °C. K dalšímu poklesu teploty cca o 2 °C dojde vlivem tepelných ztrát rozvodů. Na samotném konci u odběrových míst máme k dispozici teplou vodu o teplotě 45 °C. Studie uvádí, že taková teplota je dostatečná pro pohodlí a sanitaci. Dánská norma DS439 uvádí, že teplá voda o teplotě 45 °C je vyhovující pro potřeby v kuchyni a 40 °C pro ostatní účely [33].

Pozornost je také důležité zaměřit na způsob přípravy TUV. Dnešní systémy CZT jsou často čtyřtrubkové tzn. pro vytápění a TUV je zřízeno vlastní přívodní i vratné potrubí. Bytové domy mají vlastní zásobníky TUV a jsou vybaveny cirkulačním potrubím. Ukazuje se, že toto provedení není ideální. Čtyřtrubkové vedení má za následek vysoké tepelné ztráty v rozvodech. K těm je nutné započítat tepelné ztráty cirkulačního potrubí i zásobníku [28]. Tyto negativní aspekty lze redukovat decentralizovaným způsobem TUV. Topná voda pro vytápění i ohřev TUV je obojí vedeno společným potrubím až k samotným objektům. Každý objekt má pak vlastní soustavu na přípravu TUV. Přechodem na dvoutrubkový rozvod lze snížit tepelné ztráty v sekundárním okruhu až o 35 % [34].

V systémech CZT nové generace jsou představeny nové způsoby a řešení přípravy TUV. Jednou z nich je varianta, kdy je zásobník tepla umístěn na primární straně výměníku, tj. dodávky CZT. Odpadá starost s prevencí proti tvorbě bakterií. Teplá voda může být okamžitě ohřívána přes výměník vodou ze zásobníku.

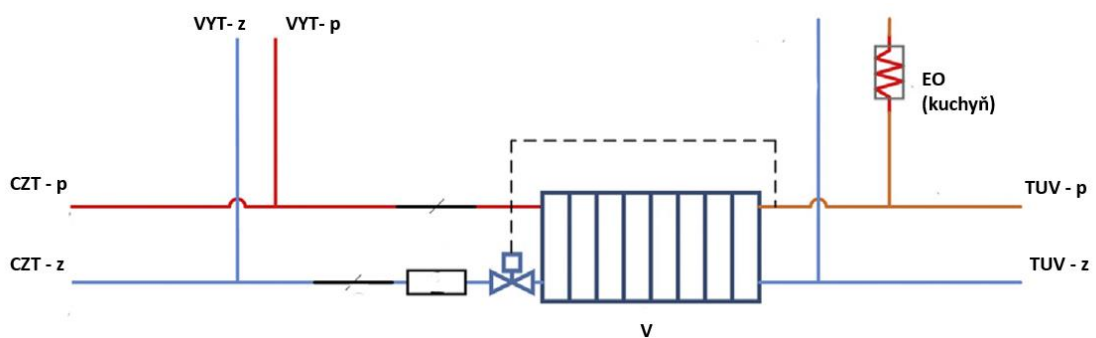


Obr. 2 Příprava TUV se zásobníkem na primární straně (CZT) – upraveno z [33]

(p – přívod; z – zpátečka; CZT – centrální zásobování teplem;

TUV – teplá užitková voda; VYT – vytápění; V – výměník; Z – zásobník)

V případech, kdy by teploty ze SCZT byly nízké a nevyhovující, v úvahu připadají přídavné individuální zdroje tepla, které teplou vodu dohřejí na požadovanou teplotu. Jednou z možností je elektrický ohřev.

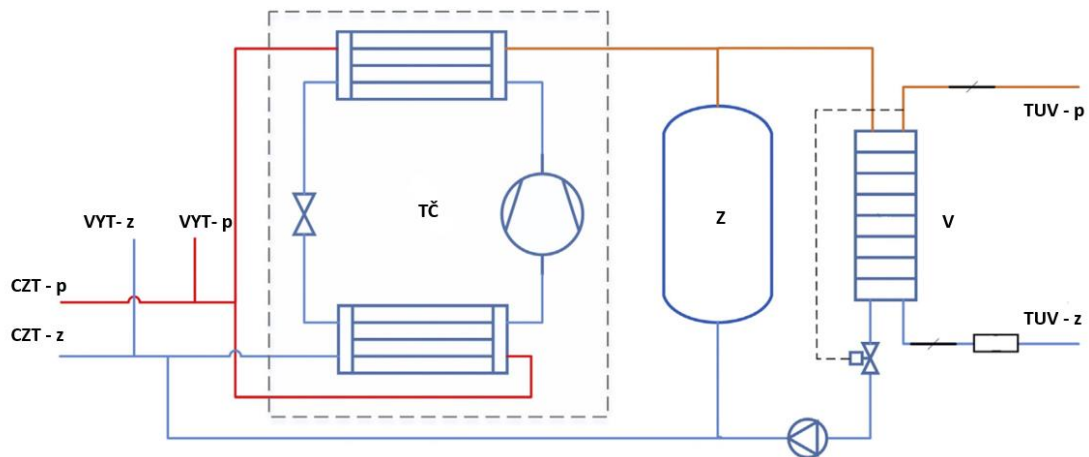


Obr. 3 Příprava TUV se elektrickým ohřevem) – upraveno z [33]

(p – přívod; z – zpátečka; CZT – centrální zásobování teplem;

TUV – teplá užitková voda; VYT – vytápění; V – výměník; Z – zásobník; EO – elektrický ohřev)

Zajímavou alternativou jsou také tepelná čerpadla. Umístěna jsou před zásobníkem vody na straně dodávky CZT. Podle potřeby zvyšují teplotu přívodu do zásobníku. Tepelná čerpadla dokážou při malých teplotních rozdílech pracovat s vysokou účinností (vysoké hodnoty COP) [33].



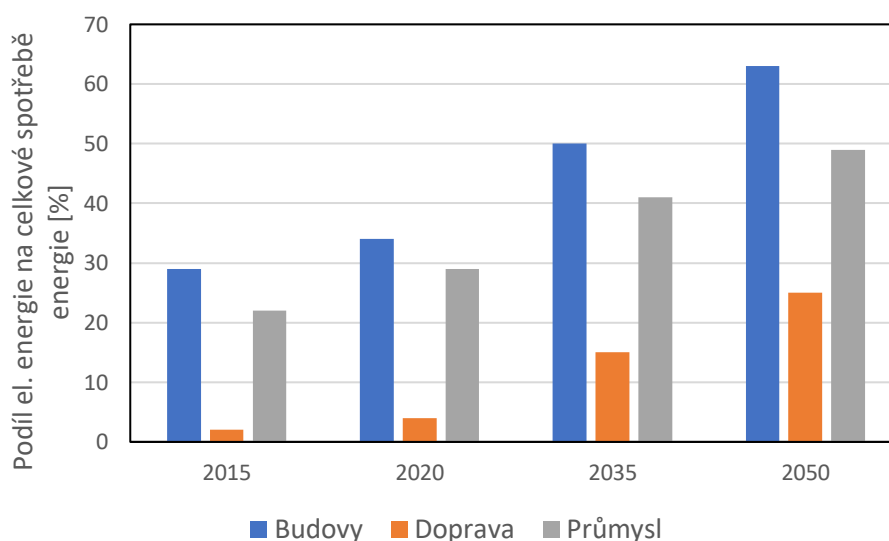
Obr. 4 Příprava TUV s tepelným čerpadlem – upraveno z [33]

(p – přívod; z – zpátečka; CZT – centrální zásobování teplem; TUV – teplá užitková voda;

VYT – vytápění; TČ – tepelné čerpadlo; V – výměník; Z – zásobník)

2.5 Elektrifikace CZT pomocí tepelných čerpadel

Za účelem dosažení stanovených klimaticko – energetických cílů se v teplárenství a obecně v energetice předpokládá rozsáhlá elektrifikace. Elektrifikace je chápána jako proces přechodu z přímého využívání fosilních paliv k výrobě elektřiny na obnovitelné a nízkouhlíkové zdroje. Elektrifikace se netýká jen samotné oblasti výroby elektřiny ale i rozšíření jejího využití [35]. Na Grafu 7 je znázorněn plánovaný růst podílu elektrické energie na celkové spotřebě energie v různých sektorech. Podíl elektřiny na celkové spotřebě tepla v budovách se má do roku 2050 více než zdvojnásobit [36]. Až ze 40 % by se elektřina mohla podílet na vytápění do roku 2030 a ze 70 % do roku 2050 [37].



Graf 7 Růst podílu el. energie v budoucnosti v jednotlivých sektorech – upraveno z [36]

Zaváděním rozsáhlé elektrifikace významně vzroste poptávka po elektřině. Výrazně se bude muset zvýšit produkce elektrické energie. Z velké části se na produkci budou podílet OZE. V souladu s evropskými cíli by se měl podíl energie z OZE zdvojnásobit na 60 % do roku 2030 a do roku 2050 by měl činit až 84 % [6].

S rostoucí podílem OZE bude potřeba zvýšit flexibilitu energetických sítí. U OZE (zejména větrné a solární elektrárny) je problém s jejich intermitentní a těžko predikovatelnou produkcí energie. Fluktuující produkce způsobuje v síti určitou nestabilitu a nesoulad mezi výrobou a poptávkou po energii. Energetické sítě musí být schopny na to umět reagovat. Zvyšují se tím nároky na flexibilitu a přenosové schopnosti soustav.

Tímto aspektem spojeným s potřebou zvýšené flexibility energetických sítí se mimo jiných zabývá technologie „energie na teplo“ (z angl. Power to Heat). Jedná se

o technologii nabízející víceúčelové využití tepelné energie jako integračního prvku energetických sektorů (tepelného, elektrický a plynárenského). Těmito integračními prvky, které pomohou tepelný sektor elektrifikovat a zároveň vytvořit synergii s ostatními sektory jsou především tepelná čerpadla, elektrické kotle, technologie KVET a dlouhodobé či krátkodobé akumulční zásobníky tepla [38].

2.5.1 Tepelná čerpadla

Tepelný sektor, resp. zdroje tepla jsou v dnešní době nadále závislé především na fosilních palivech. Počet konvenčních fosilních zdrojů tepla je stále vysoký. Vývojové trendy CZT však směřují k takovým zdrojům tepla, které dokážou funkčně nahradit stávající fosilní konvenční zdroje tepla a pomohou tak snížit celkové emise skleníkových plynů v tomto sektoru. Jako nejvhodnější dostupná varianta vycházejí tepelná čerpadla (TČ) [14].

Tepelná čerpadla jsou v EU chápána jako alternativní zdroje energie. Jejich funkční princip spočívá v odnímání nízkopotenciálního tepla jiným zdrojem (okolní vzduch, vodní zdroje, zemský masiv, odpadní teplo apod) a následném převádění tepla na vyšší teplotní hladinu použitelnou pro vytápění, chlazení nebo přípravu TUV [39]. TČ umožňují využít zdroje energie, které byly pro systémy CZT doposud nedostupné a jejich teplotní úrovně nevyhovující. Lze tak například nyní pro zásobování teplem využít odpadního tepla (z průmyslových procesů nebo z data center), které by jinak své využití nemělo [14].

Nejčastěji se v systémech CZT setkáváme s kompresorovými tepelnými čerpadly, kterým je nutno dodávat elektrickou energii. Existují však aplikace i s absorpčními TČ. Ty pro svůj provoz potřebují místo elektriny dodávat teplo. Ve Švédsku se například absorpční TČ využívají jako doplňkový prvek kogeneračních jednotek (spaloven odpadů). Zvyšuje se tím celková efektivita výroby tepelné a elektrické energie [42]. Za rok 2018 bylo na celém světě instalováno více než 20 miliónů TČ (centrálních a decentrálních) a další masivní rozšiřování se v budoucnu očekává [40]. Významně se budou v budoucnu podílet na snížení emisí skleníkových plynů v energetickém sektoru.

Do roku 2050 by mělo teplo dodaného SCZT pokrýt až 50 % celkové spotřeby tepla. 25 – 30 % z celkového dodaného tepla SCZT by měla pokrýt TČ [41]. Odhaduje se, že TČ by mohla do roku 2050 ušetřit až 1.25 miliardy tun skleníkových plynů CO₂. Ekologičnost provozu TČ je však závislá na energetickém mixu v síti [14].

TČ dokážou pracovat s několikanásobně vyšší účinností než konvenční zdroje tepla. Jejich účinnost se hodnotí pomocí topného faktoru COP. Faktor COP je definován jako poměr tepelného výkonu TČ a celkového elektrického příkonu (pohon kompresoru, regulace apod) [42]. Mathiesen et al. v rámci studie [41] provedené v roce 2017 zpracovává databázi a použitou technologii TČ v systémech CZT v evropských lokacích. Studie uvádí, že průměrné roční hodnoty COP se mohou pohybovat od 3 až do 9. Nejčastěji uvažovaná průměrná hodnota COP je 4 [43]. Záleží však na teplotách zdroje tepla, požadované výstupní teplotě z TČ a dalších faktorech.

V Tab. 3 jsou uvedeny jednotlivé druhy tepelných zdrojů pro TČ, jejich poskytované teplotní parametry, počet instalovaných jednotek a jejich celkový výkon v EU.

Tab. 3 Tepelné zdroje pro TČ a jejich typické teploty – upraveno z [41]

Zdroj tepla	Instalovaný výkon [MW]	Počet instalovaných jednotek [-]	Průměrný výkon na jednotku [MW]	Teplotní rozsah [°C]
Odpadní voda	891	54	17	10-20
Vodní zdroje	390	34	11	2-15
Průmyslové odpadní teplo	129	28	5	12-46
Geotermální energie	97	19	5	9-55
Spaliny	40	7	6	34-60
Dálkové chlazení	30	4	7	0-9
Akumulace solární energie	4	3	1	10-35

TČ lze dle dosažených teplot na výstupu rozdělit na nízkoteplotní (do 50 °C), vysokoteplotní (do 90 °C) a ultra vysokoteplotní (nad 90 °C). V Tab. 4 jsou vidět typické průměrně hodnoty COP pro různé rozsahy požadovaných teplot na výstupu z TČ instalovaných v EU.

Tab. 4 Průměrné roční hodnoty COP – upraveno z [41]

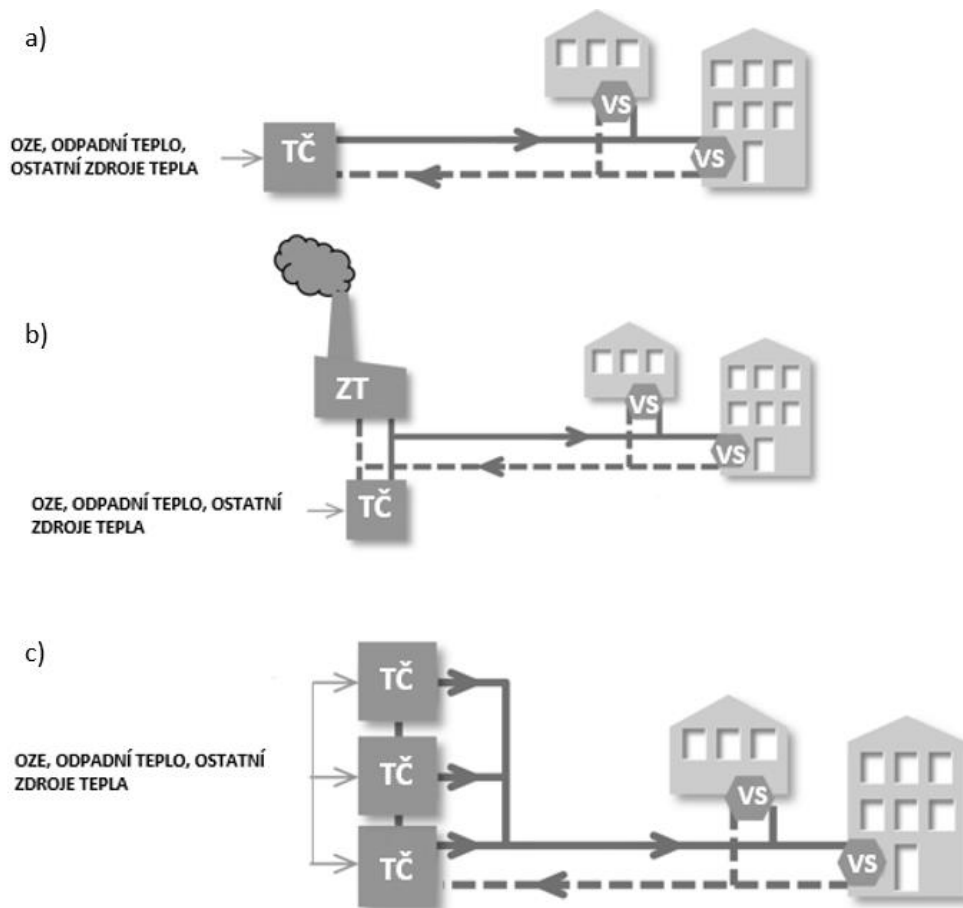
Teplota na výstupu z TČ [°C]	<70	71-80	>80
Průměrná hodnota COP [-]	4,5	3,6	3,7

Teploty teplonosné látky na výstupu z TČ musí odpovídat teplotním parametrům systému CZT a mohou dosahovat hodnot vyšších než 90 °C. Z Tab. 4 je zřejmé, že při vysokých žádaných teplotách významně klesá COP. Obecně platí, že čím je žádaná teplota na výstupu z TČ nižší, tím je účinnost TČ vyšší. Hodnot COP 6,5 dosahují

například TČ v systémech CZT ve Švédsku, které zvyšují teplotu vratné otopné vody v CZT pouze o pár °C. Naopak v Miláně TČ, které čerpají geotermální energii a teplotní rozdíl na vstupu a výstupu z TČ činí až 75 °C, dosahují hodnot COP pouze 2,6. V moderních soustavách CZT s nízkými provozními teplotami mohou TČ dosahovat velmi vysokých hodnot COP [41].

TČ mohou zaujímat různé role v systémech CZT. Záleží na způsobu jejich integrace, zapojení, umístění a provozních režimech. TČ mohou být integrována do soustav CZT za různými účely (podpora stávajícího zdroje tepla, pro zvýšení tepelné kapacity při rozšiřování zásobované oblasti, budování nových systémů CZT na bázi TČ).

Podle počtu zdrojů rozlišujeme SCZT s jedním a více zdroji tepla.

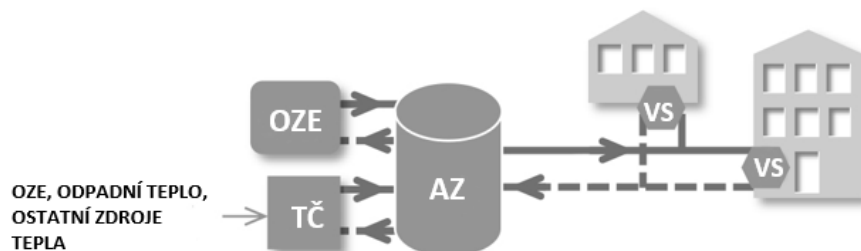


Obr. 5 Zapojení tepelného čerpadla v soustavě CZT

(ZT – zdroj tepla; TČ – tepelné čerpadlo; VS – výměňková stanice)

V případě jednoho zdroje tepla (Obr 5a) se jedná o centrální zdroj pokrývající potřeby tepelné energie v plném rozsahu (včetně špičkových odběrů) po celou dobu období vytápění. U SCZT s více zdroji tepla se většinou jedná o nějakou kombinaci typů zdroje tepla, které mohou pracovat v částečném zatížení. Snahou je docílit prioritního provozu TČ. Zbývající zdroj tepla slouží jako doplňkový zdroj pro pokrytí odběrových špiček. Zdroje mohou být zapojeny paralelně (Obr 5b) nebo sériově. Častým uspořádáním soustavy s více TČ je tzv. vícestupňové řazení (Obr 5c). Podle potřeby je v provozu odpovídající počet tepelných čerpadel [14].

Inovativní příklad aplikace tepelného čerpadla v rámci CZT lze vidět na Obr. 6. Tepelné čerpadlo je zapojeno paralelně s jiným zdrojem tepla, a navíc je soustava doplněna o systém sezonní akumulace tepelné energie. Akumulační zásobníky spolu s TČ stabilizují provoz energetických sítí s vysokým podílem OZE [14]. Stabilizace je potřebná v časech, kdy jsou elektrické sítě od přebytků energie z OZE přetížené a poptávka po elektrické energii je nízká. Přebytečná elektrická energie může být pomocí TČ poměrně efektivním způsobem převedena na energii tepelnou, kterou lze využít pro dodávky tepla CZT nebo uložit do akumulčních zásobníků pro budoucí využití. Zásobníky tepla tak umožňují sektorové propojení dodávek elektřiny a tepla [44].



Obr. 6 Systém CZT s více zdroji a akumulací tepla – upraveno z [14]
(OZE – obnovitelné zdroje energie; TČ – tepelné čerpadlo;
VS – výměňová stanice; AZ – akumulční zásobník)

Alternativou TČ a jejich role v elektrifikaci mohou být elektrické kotle. Investiční náklady elektrických kotlů jsou v porovnání s TČ výrazně nižší. Jejich účinnost je však řádově nižší, a navíc neumožňují využívat takové zdroje tepla jako v případě TČ. Elektrické kotle slouží nejčastěji jako doplňkový zdroj k TČ [41].

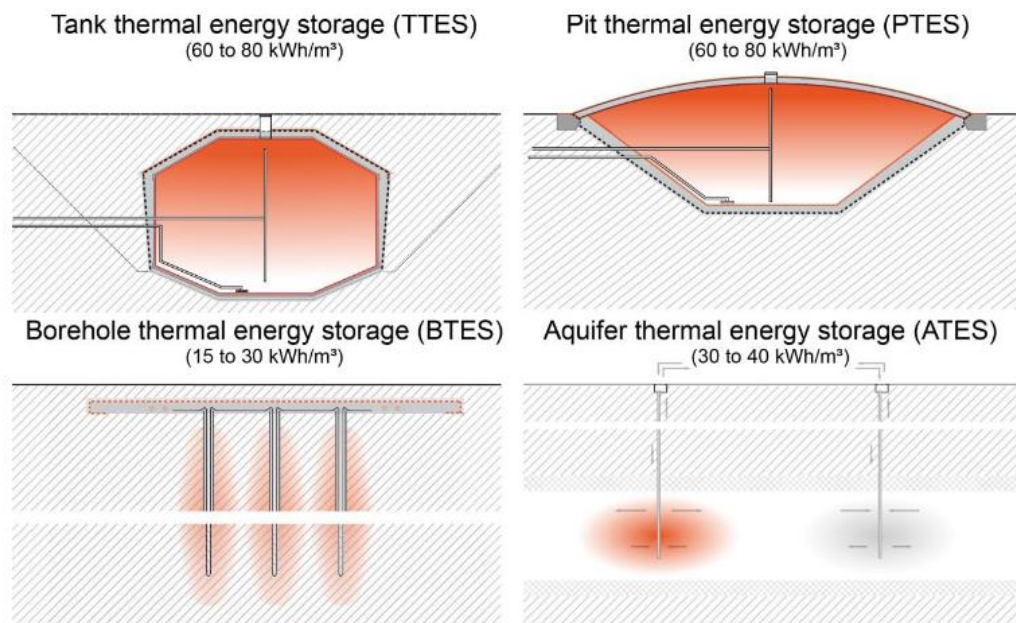
2.5.2 Skladování tepelné energie

Z hlediska časových parametrů rozlišujeme zásobníky s krátkodobou a dlouhodobou akumulací tepla.

Krátkodobé zásobníky slouží pro akumulaci tepla v řádech dnů. Nejčastěji se využívají pro přípravu TUV, kdy její potřeba tepla je víceméně během roku konstantní.

Dlouhodobé tzv. sezónní zásobníky dokážou uchovat uloženou energii podobu několika měsíců, typicky od léta do zimy a opačně.

Nejrozšířenější typy sezónních akumulačních zásobníků jsou zobrazeny na Obr. 7.



Obr. 7 Druhy sezónních zásobníků tepelné energie [45]

Zjednodušeným principem fungování výše zobrazených typů uložistí je čerpání/ukládání tepla z/do zásobníku, které je teplonosnou látkou v potrubním systému s oběhovými čerpadly dopraveno do výměňkové stanice, kde se následně pomocí výměníků tepla a tepelného čerpadla předává do systému vytápění/chlazení spotřebitelského okruhu. Obecně lze jednotlivé typy mezi sebou kombinovat.

ATES (z angl. aquifer thermal energy storage) je akumulace tepelné energie pod zemský povrch do propustného podloží. Jako uložistě pro ukládání a zpětné získávání tepla se využívá spodních vod tzv. studny – teplé a studené. Studny zasahují od 50 do 300 metrové hloubky pod zemský povrch. Odděleny musí být nepropustnými vrstvami horniny. Tepelná kapacita zásobníku je okolo 30 – 40 kWh/m³ [45].

BTES (z angl. Borehole thermal energy storage) je způsob ukládání tepelné energie přímo do zemského povrchu pomocí podzemních vrtů. Zásobníkem tepla je zde samotný objem zeminy. Teplo je z/do zásobníku předáváno skrze soustavu vrtů dosahující hloubky až 100 metrů. Vrty jsou vybaveny polyethylenovým U potrubím, kterým proudí teplotonosná látka (voda, glykol) k výměňkové stanici. Vrchní vrstva zásobníku se kvůli tepelných ztrátám izoluje. Vhodný typ zeminy pro účinný provoz zásobníku, je takový, který obsahuje hodně kameniva s vysokou tepelnou kapacitou. Oproti ATES je zde přítomnost přirozených toků podzemních vod nežádoucí. Kapacita BTES je jen okolo 25 kWh/m³. Proti vodním zásobníkům vycházejí rozměrově (objemově) řádově větší. Minimální objem pro výhodný ekonomický provoz se uvádí minimálně 20000 m³ [46].

TTES (z angl. Tank thermal energy storage) je ukládání energie do zcela/částečně podzemního zásobníku tvořeným železobetonovou nebo ocelovou nádrží naplněnou vodou. Nádobu se kvůli velkým tepelným ztrátám (až 50 % uložené energie) musí izolovat. Kapacita uložení je v rozmezí 60 – 80 kWh/m³ [47].

PTES (z angl. Pit thermal energy storage) je technologie ukládání tepelné energie podobná TTES. V tomto případě se ale namísto betonové nebo ocelové nádrže využívá velké jámy v zemském povrchu. Jáma je utěsněna, izolována, naplněna vodou a vybaveno plovoucím krytem. Díky vodě jako akumulární hmotě mají systémy PTES kapacitu uložení okolo 60 – 80 kWh/m³. Díky výrazně nižším pořizovacím nákladům a vysoké akumulární schopnosti patří zásobníky PIT k nejrozšířenějším [45].

3. Metodika pro vyhodnocení modernizace CZT

V této kapitole je popsán navrhovaný postup řešení zadaného problému, který je rozdělen do několika dílčích kroků. Ze zadání a na základě literární rešerše plyne následující výzkumná otázka:

- Jaké dopady mají úsporná opatření a modernizace systémů CZT na energetickou náročnost a produkci uhlíkových emisí?

Pro vyřešení této otázky je třeba dosáhnout dílčích cílů, které jsou podrobně popsány v následujících kapitolách.

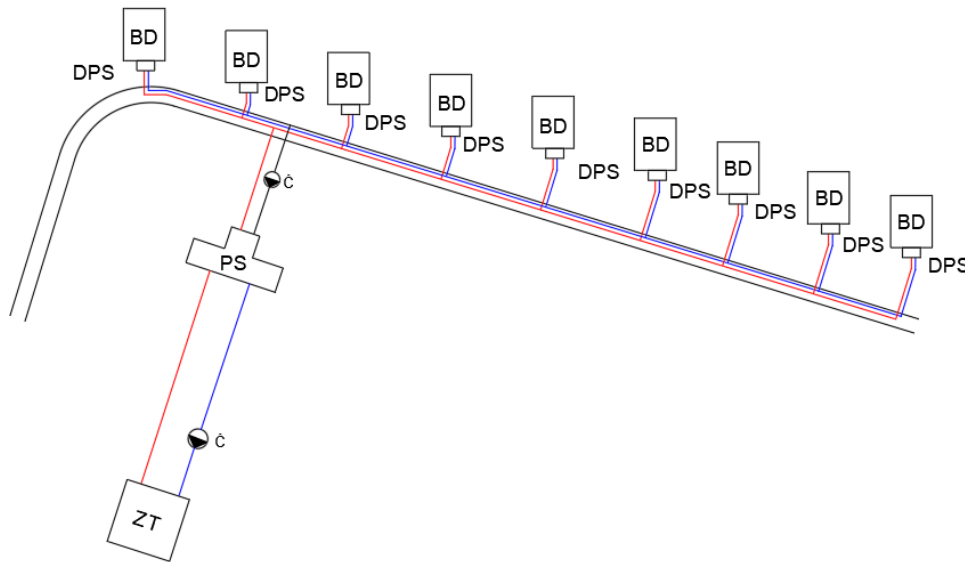
- 1) Výběr případové studie
- 2) Návrh modernizačních scénářů
- 3) Specifikace a volba KPI
- 4) Vývoj numerického modelu
- 5) Vyhodnocení modernizačních scénářů na základě energetické simulace

3.1 Popis studovaného případu CZT

V této kapitole je definován studovaný případ CZT a popsány jednotlivé scénáře reprezentující různé možnosti modernizace aplikované na příkladovém systému CZT.

Studovaným případem je teplovodní SCZT. Centrálním zdrojem tepla je výtopna s kotlem na uhlí o jmenovitém tepelném výkonu 1,7 MW. Výtopna zajišťuje dodávku tepla na vytápění pro skupinu devíti osmipodlažních bytových domů s rokem výstavby 1977. Jeden bytový dům má 32 bytových jednotek. Jedná se o typické bytové domy montované z prefabrikátu bez tepelné izolace, nepodsklepené, s jednoplášťovou střechou a typizovanými jednoduchými okny. Uvažovaná měrná potřeba tepla na vytápění takového bytového domu je 149 kWh/m².rok. Bytové domy jsou z hlediska parametrů (stavebních i technických) totožné. Dodávka chladu, a tepla na přípravu TUV nejsou předmětem této práce. Studovaný případ vychází ze zadání oborového předmětu “ Zásobování teplem“, kde jsou uvedeny základní návrhové hodnoty pro tepelnou síť zásobující skupinu bytových domů v lokalitě Praha – Barrandov [23]. Na Obr. 8 je vidět schématické zobrazení studovaného případu. Z centrálního zdroje je teplo primární tepelnou sítí s návrhovým teplotním spádem 90/65 °C dopravováno do společné předávací stanice. Tam se teplo předává do sekundární tepelné sítě s návrhovým

teplotním spádem 72/60 °C a je následně distribuováno do jednotlivých domovních předávacích stanic spotřebitelského okruhu, tj. jednotlivých bytových objektů. Tepelná síť svým uspořádáním odpovídá paprskovitě větvené, dvojtrubkové, uzavřené síti. Konkrétní parametry (teploty, průtoky apod.) studovaného případu jsou detailněji uvedeny v kapitole 4.2.



Obr. 8 Schématické zobrazení studovaného případu CZT
Zkratky: ZT-zdroj tepla; PS-předávací stanice; Č-čerpadlo; DPS-domovní předávací stanice;
BD-bytový dům

3.2 Návrh modernizačních scénářů

Na základě poznatků z rešeršní části práce, uvedené v kapitole 2, byly navrženy následující scénáře modernizace pro studovaný případ CZT. Mají demonstrovat vliv různé úrovně modernizace budov, tepelné sítě a zdroje tepla.

Tab. 5 Návrhové scénáře modernizace studovaného systému CZT

		Stav na straně budov	Tepelná síť	Zdroj tepla
SCÉNÁŘ	1. Konvenční CZT	Nezrekonstruováno	Vysoké teploty 90/65 °C a 72/50 °C	Kotel na uhlí
	2. CZT s progresivním úsporným opatřením	Rekonstrukce (zateplení a výměna oken)	Snížené teploty 65/45 °C a 52/40 °C	Kotel na zemní plyn
	3. Částečná elektrifikované CZT s progresivním úsporným opatřením	Rekonstrukce (zateplení a výměna oken)	Snížené teploty 65/45 °C a 52/40 °C	Tepelné čerpadlo a kotel na zemní plyn
	4. Plně elektrifikované CZT s progresivním úsporným opatřením	Rekonstrukce (zateplení a výměna oken)	Snížené teploty 65/45 °C a 52/40 °C	Tepelné čerpadlo a elektrokotel

Scénář 1 reprezentuje stávající systém již popsaného studovaného případu CZT, kde návrhové provozní teploty jsou vysoké, bytové domy vykazují vysokou energetickou náročnost a zdroj tepla, tj. kotel spalující uhlí produkuje značné množství emisí skleníkových plynů.

Ve 2. scénáři se v rámci energetických úspor bytové domy, resp. jejich obvodový plášť a střecha opatří tepelnou izolací a původní jednoduchá typizovaná okna se vymění za izolační okna s trojskly. Těmito úspornými opatřeními se očekává snížení spotřeby tepla na straně odběratele. Vysoké provozní teploty vykazující vysoké tepelné ztráty v rozvodech jsou sníženy na teploty odpovídající nízkoteplotním systémům CZT, tj. maximální teplota přívodní otopné vody do 70 °C. Za účelem snížení emisí skleníkových plynů je nahrazeno stávající uhelné palivo za zemní plyn.

Scénář 3 vychází z popisu předchozího scénáře, kdy se sníží energetická náročnost bytových domů jejich zateplením a výměnou původních oken. Nízké provozní teploty pomohou zvýšit účinnost celého systému a umožní do soustavy integrovat alternativní zdroj energie využívající nízkopotenciální teplo svého okolí. Jako centrální zdroj tepla slouží tepelná čerpadla vzduch – voda. Tepelná čerpadla přispějí k částečné elektrifikaci studovaného případu CZT a v závislosti na ekologičnosti jejich provozu (COP a aktuální energetický mix) i ovlivní množství vyprodukovaných emisí skleníkových plynů. Pro pokrytí odběrových špiček tepla v zimních měsících je v systému kotel na zemní plyn.

Scénář 4 je shodný se scénářem 3 pouze s rozdílem, že systém je plně elektrifikovaný. Tepelná čerpadla vzduch voda slouží jako centrální zdroj výroby tepla a špičkovým zdrojem tepla je místo kotle na zemní plyn elektrokotel.

Cílem všech zmíněných scénářů je vyhodnotit roční dodávku tepla na vytápění soustavou CZT daného scénáře.

3.3 Volba simulačního nástroje

K analýze a práci se systémy CZT je výhodné využít simulačních nástrojů. Vyhodnocení a měření takto komplexních a složitých systémů by bylo konvenčními metodami velmi obtížné a časově náročné. V této kapitole jsou představeny vybrané simulační softwary vhodné pro vyhodnocování provozu systémů CZT.

Studovaný případ nevychází z reálné aplikace systému CZT. Jedná se o systém s předem definovanými parametry, ke kterému neexistují žádná data z měření. Simulace umožňují provést roční simulaci provozu SCZT a pomáhají predikovat chování a reakce celého systému na změny vstupních parametrů (např. venkovní teplota, průtok čerpadlem apod.) v čase. Simulace dále umožňují simulovat jednotlivé scénáře za shodných okrajových podmínek (klimatická data, doba letní odstavky apod). To je pro porovnávání scénářů mezi sebou zásadní. Většina simulačních nástrojů, vhodných pro modelování systémů CZT, je založena na matematickém modelu „white box“, který popisuje reálné systémy s využitím rovnic definujících základní fyzikální principy oborů jako je mechanika tekutin, termodynamika a hmotnostní a energetická bilance [48].

V Tab. 6 je uveden výběr často používaných softwarů pro simulační účely v rámci systémů CZT. Spektrum existujících simulačních nástrojů lze rozdělit dle jejich používání na nástroje pro plánování (RETScreen a EnergyPlan), pro ekonomické účely (SAM a HOMER) a pro energetické návrhy (TRNSYS, OpenModelica a Thermos)

Vhodně zvolený simulační nástroj umožní sestavit a nasimulovat studovaný případ, aplikovat možnosti modernizace CZT a vyhodnotit roční dodávku tepla na vytápění všech návrhových scénářů. Pro simulační analýzu byl zvolen simulační nástroj TRNSYS (z angl. Transient System Simulation Program). Tento program byl zvolen na základě splnění potřebných kritérií pro zpracování analýzy studovaného případu CZT a také proto, že jsem absolvoval předmět “Introduction to Building Performance Simulation“.

Tab. 6 Simulační softwary pro modelování systémů CZT

Nástroj	Použití	Obor	Zaměření	Vývojář	Licence	Zdroj
EnergyPlan	podpora plánování strategie	mezioborový (vytápění, chlazení, doprava a průmysl)	tepelné sítě	Aalborg University (DN)	zdarma	[49]
TRNSYS	podpora energetického návrhu	HVAC, budovy, OZE	tepelné a elektrické sítě	Wisconsin University (US)	placená	[50]
HOMER	podpora energeticko-ekonomického návrhu	elektroenergetika	optimalizace mikrosítí	NREL & DOE (US)	placená	[51]
SAM	podpora energeticko-ekonomického návrhu a optimalizace	mezioborový	tepelné sítě - OZE	NREL & DOE (US)	zdarma	[52]
RETScreen	podpora plánování strategie	mezioborový	posouzení a optimalizace OZE	Dassault Systemes SE (FR)	zdarma	[53]
Thermos	podpora energetického návrhu	teplárenství	optimalizace energetických procesů CZT	the Government of Canada	zdarma	[54]
OpenModelica	podpora energetického návrhu + modelovací jazyk	mezioborový	průmysl	Linköping University (SW) & OSMC	zdarma	[55]



3.4 Volba klíčových indikátorů

Aby bylo možné jednotlivé scénáře ze simulační analýzy energetického chování příkladového systému CZT mezi sebou porovnávat a hodnotit, byly stanoveny hodnotící ukazatelé (z angl. Key Performance Indicators – KPI). Vzhledem k povaze zadání byly zvoleny ukazatele popisující energetickou náročnost a dopady na životní prostředí.

Ukazatelé energetické náročnosti:

Úspora spotřebované energie

Úspora spotřebované energie vyjadřuje, kolik energie na dodávkách tepla bylo daným úsporným opatřením v SCZT ušetřeno ve srovnání s celkovou spotřebovanou energií referenčního scénáře při stejné typologii studovaného systému CZT a při zachování tepelné pohody spotřebitelů [56].

Roční měrná potřeba tepla na vytápění

Roční měrná potřeba tepla na vytápění vyjadřuje množství tepla, které budova potřebuje pro udržení potřebných parametrů vnitřního prostředí vztaženého na jednotku podlahové plochy za rok ($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{rok}$). Umožňuje srovnávat tepelně – technický stav budovy před a po rekonstrukci [57].

Relativní tepelné ztráty

Relativní tepelné ztráty definují poměr množství ztraceného tepla v důsledku tepelných ztrát rozvodů tepelných sítí a množství dodaného tepla do SCZT za dobu provozu v období vytápění [58].

Ukazatel enviromentálního dopadu:

Úspory emisí CO₂

Úspora vyjadřuje ušetřené množství vyprodukovaných emisí CO₂ dosažené daným úsporným opatřením. Celkové emise znečišťujících látek vyprodukovaných zdrojem tepla je možné stanovit z celkového množství vyprodukovaného tepla do SCZT a příslušných emisních faktorů [59]. Emisní faktor (tCO_2/kWh) je měrný ukazatel, který určuje množství oxidu uhličitého připadajícího na jednotku energie ve spalovaném palivu. Při výpočtu je důležité používat faktory poskytnuté národními energetickými společnostmi pro každý konkrétní energonositel. Emisní faktory se mohou lišit dle účinnosti využití daného energonositele [15].

V případě elektrické energie není vhodné stanovit emisní faktor jedním číslem. Je totiž časově variabilní a závislý na celkové skladbě energetických zdrojů tzv. energetickém mixu výroby elektrické energie. Stanovení emisního faktoru je možné ze statistických dat z předchozích období [61]. Jedná se o hodinové vyhodnocení na základě intenzity CO₂ pro konkrétní stát [73]. V případě energetického mixu se pro porovnání emisí různých skleníkových plynů používá tzv. CO₂ ekvivalent, tedy množství CO₂, které by mělo ekvivalentní příspěvek ke skleníkovému jevu atmosféry stejný jako dané množství příslušného plynu. Množství emisí CO₂ ekvivalent se vypočítá jako spotřebovaná elektrická energie násobená emisním faktorem pro elektrickou energii. Obě pro konkrétní čas (hodinu). Převod z CO₂ na CO₂ekv. není nutný, protože se rovná 1 [59].

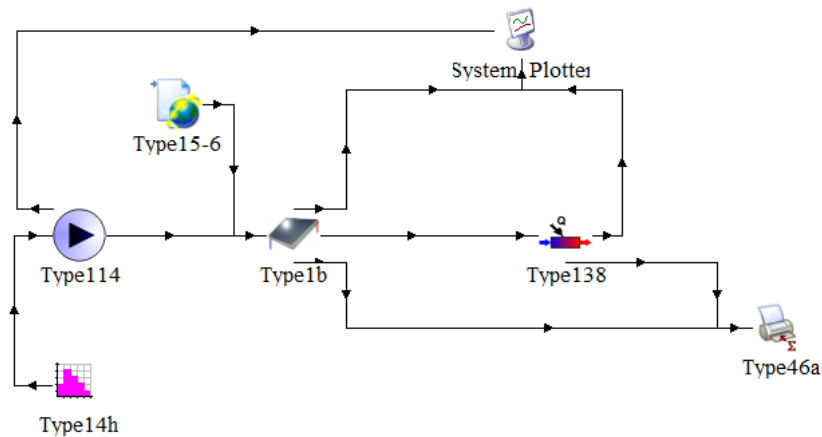
Konkrétní emisní faktory a profil intenzity CO₂ jsou uvedeny v kapitole 4.3 v rámci okrajových podmínek.

4. Vývoj numerického modelu

V této kapitole jsou popsány simulační modely všech návrhových scénářů. Všechny vychází ze základního modelu. Na něm jsou představeny a vysvětleny použité moduly simulace. Simulační schéma je pro základní model a všechny simulované scénáře až na odlišnosti v primárním okruhu shodné. Dále jsou detailněji rozepsány jednotlivé scénáře a uvedeny hlavní parametry systémů a parametry jednotlivých modulů v simulačních modelech. Všechny vypočítané parametry vychází z výpočetního excelu (příloha PE1). Veškeré informace o použitých modulech a jejich principech fungování jsou čerpány z manuálu TRNSYS [62].

4.1 Základní komponenty modelu v prostředí TRNSYS

Simulační nástroj TRNSYS slouží k simulování a hodnocení energetických systémů (tepelných a elektrických). Nástroj vychází z matematického modelu “white box“ a pracuje s tzv. moduly. Moduly se značí „Type xx“ a reprezentují konkrétní komponenty simulačního schématu (např: Type 1 b značí solární panel, Type 114 značí oběhové čerpadlo apod.). Jednotlivé komponenty se mezi sebou propojují a vytváří se vlastní simulační schéma pro simulaci konkrétní aplikace.

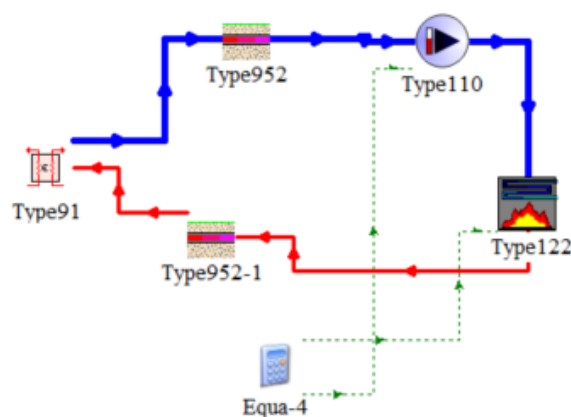


Obr. 9 Příklad simulačního schéma v TRNSYS [62]

Vstupní parametry, konstanty, externí data, okrajové podmínky apod. musí definovat uživatel. Za předpokladu správného nadefinování se po uplynutí doby nutné k provedení celé simulace získají zkoumané výstupy, ze kterých se vyhodnotí výsledky. Program obsahuje knihovnu s širokým výběrem komponent pro různé účely. Je možnost si vytvořit i vlastní komponentu. Pro účely této práce je nabídka knihovny plně dostačující [62].

Vzhledem k velikosti a pro lepší orientaci je schéma **základního modelu** rozděleno a popsáno ve třech okruzích – primární, sekundární a spotřebitelský. Celé simulační schéma základního modelu je zobrazeno v příloze (P1). Model je obecný a slouží pro simulaci všech návrhových scénářů.

4.1.1 Primární okruh



Obr. 10 Simulační schéma primárního okruhu

Primární okruh je část soustavy CZT od centrálního zdroje tepla k předávací stanici. Jeden centrální zdroj tepla (Type 122) nacházející se mimo obytnou oblast vyrábí teplo pro dodávky tepla na vytápění. Zdroj předává teplo do primární tepelné sítě. Tepelná síť

je tvořená potrubními rozvody (Type 952) a oběhovým čerpadlem (Type 110). Teplo je dopravováno do jedné společné předávací stanice (Type 91), kde je předáno do sekundárního okruhu.

Modul zdroje tepla

Zdroj tepla je reprezentován modulem Type 122. Jedná se o modulační fluidní kotel, u kterého se nastavuje žádaná teplota otopné vody na výstupu, jmenovitý výkon a tzv. minimální podíl výkonu kotle. Lazzarin ve své studii [63] popisuje minimální podíl výkonu pomocí modulačního poměru, který udává, do jakého výkonu může kotel fungovat nepřetržitě, aniž by musel pracovat v neefektivním režimu ON/OFF. Modulační poměr byl pro všechny scénáře na základě výše zmíněné studie zvolen 1:4. Znamená to, že výkon kotle lze spojitě modulovat do 20 % jmenovitého výkonu. Pod 20 % jmenovitého výkonu kotel pracuje v režimu ON/OFF. Výkon kotle lze řídit na základě externího řídicího signálu. Není-li výkon řízen externě, pak si kotel moduluje svůj výkon na základě interního řízení, které v sobě modul zahrnuje. Podle potřeby si modul sám výkon snižuje/zvyšuje, aby na výstupu ze zdroje bylo dosaženo nastavené žádané teploty otopné vody.

Modul potrubí

Pro modelování přívodního a vratného potrubí byl použit modul Type 952. Modul představuje válcovou trubku opatřenou tepelnou izolací a uloženou do definované hloubky pod zem. Modul umožňuje v simulaci zohlednit tepelné ztráty v potrubních rozvodech. Na základě provedených výpočtů vycházejících ze vztahů uvedených v [23] se v modulu nastavují parametry potrubí (průměr, tloušťka tep. izolace, hloubka uložení apod.) Výpočet je uveden ve výpočetním excelu v příloze (PE1).

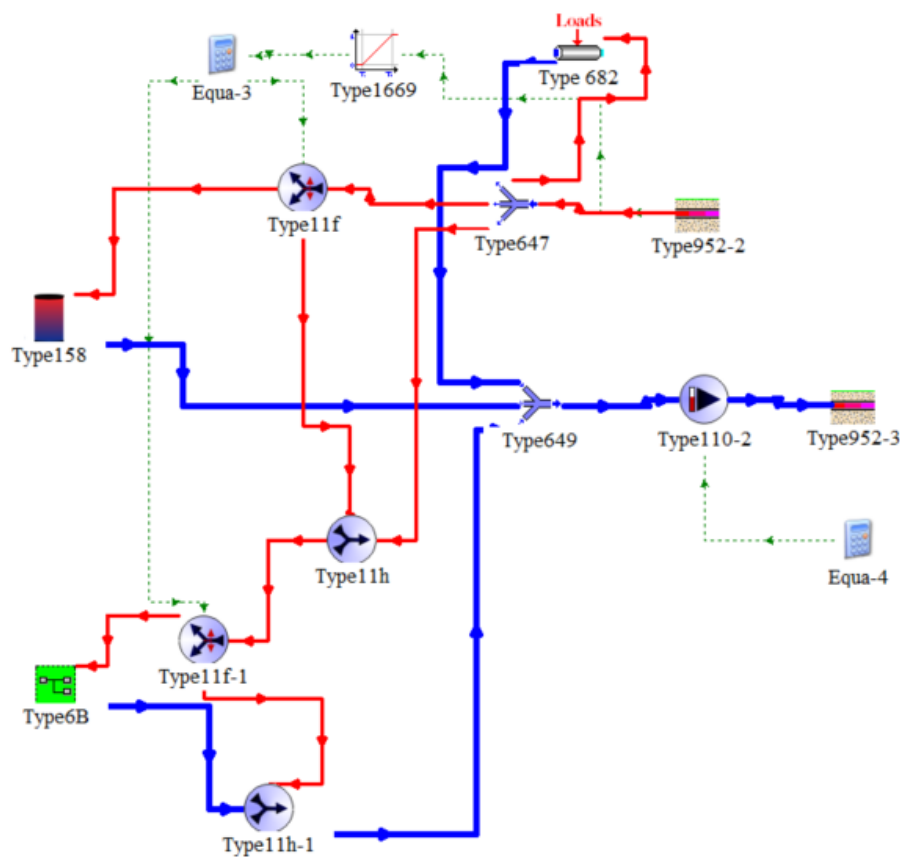
Modul oběhového čerpadla

Oběhová čerpadla primárního, sekundárního i spotřebitelského okruhu jsou modelovány modulem Type 110. Tento modul reprezentuje oběhové čerpadlo s proměnlivými otáčkami a možností řízení podle externího řídicího signálu nabývajících hodnot $<0; 1>$. Oběhová čerpadla primárního a sekundárního okruhu jsou v modelech všech scénářů (kromě primárního okruhu 1. scénáře) řízena signálem ON/OFF. Vyjma letní odstávky celé SCZT jsou oběhová čerpadla nepřetržitě v provozu. Ve spotřebitelském okruhu má oběhové čerpadlo vlastní řízení. Nastavuje se jmenovitý průtok, který vychází z návrhového výpočtu.

Modul předávací stanice

Modul Type 91 představuje výměník tepla s konstantní účinností. V předávací stanici dochází k úpravě teplotních parametrů otopné vody. Přenos tepla mezi primárním a sekundárním okruhem je vypočten na základě definované účinnosti a známých hodnot hmotnostních průtoků a teplot vstupní otopné vody na obou stranách výměníku. Výpočet účinnosti výměníku pro každý ze scénářů je uveden ve výpočetním excelu (příloha PE1).

4.1.2 Sekundární okruh



Obr. 11 Simulační schéma sekundárního okruhu

Sekundární okruh je část soustavy CZT od předávací stanice k jednotlivým domovním předávacím stanicím. V předávací stanici dochází k výměně tepla mezi primárním a sekundárním okruhem. Předané teplo je sekundární tepelnou sítí (potrubí – Type 917) a oběhovým čerpadlem (Type 110) dopravováno k rozdělovacímu ventilu (Type 647). Z rozdělovacího ventilu vedou odbočky k domovním předávacím stanicím (Type 158) jednotlivých bytových domů. Před každou domovní předávací stanicí je ještě navíc jeden rozdělovací ventil (Type 11f), který chrání domovní

předávací stanici, před nedovoleným překročením navržených teplot a přepouští přebytečné teplo dále do sítě.

Moduly oběhového čerpadla a potrubí jsou pro sekundární okruh stejné a jsou již popsány v primárním okruhu.

Moduly rozdělovacích a směšovacích armatur

Hlavní rozdělovač je modelován pomocí modulu Type 647. Nastavuje se počet výstupů z rozdělovače a příslušný dělicí poměr. Aby byl vstupní průtok správně rozdělen mezi jednotlivé spotřebitelské okruhy, je nutné dělicí poměr vypočítat. Dělicí poměr je fixovaný, nelze ventil řídit. U hlavního sběrače modul Type 649 se nastaví jen požadovaný počet vstupů a správně se propojí s navazujícími moduly.

K modelování rozdělovacích a směšovacích armatur před každou domovní předávací stanicí jsou použity moduly Type 11 f, resp. Type 11 d. Obě armatury jsou třicestné. Modul Type 11f reprezentuje motoricky řízený rozdělovací ventil. Dělicí poměr je určen na základě řídicího signálu z proporčního regulátoru Type 1669. Signál je generován na základě zvoleného rozsahu teplot na regulátoru. Pomocí modulu Type Equa-3 je omezen zdvih ventilu. Zajistí se tak bezpečnost před ztrátou regulační schopnosti ventilu. Parametry modulu Type 11 d modelují směšovací armaturu, která se nijak nenastavuje, pouze se správně propojí s navazujícími moduly.

Pro obě rozdělovací armatury platí, že teploty jednotlivých proudů po rozdělení jsou rovny teplotě vstupního proudu do armatury a příslušné průtoky jednotlivých odboček se určí na základě matematických referencí uvedených v manuálu [64].

V případě směšovacích armatur, je teplota výstupního proudu určena na základě směšovací rovnice viz [64] a výstupní hmotnostní průtok je dán součtem vstupních hmotnostních průtoků.

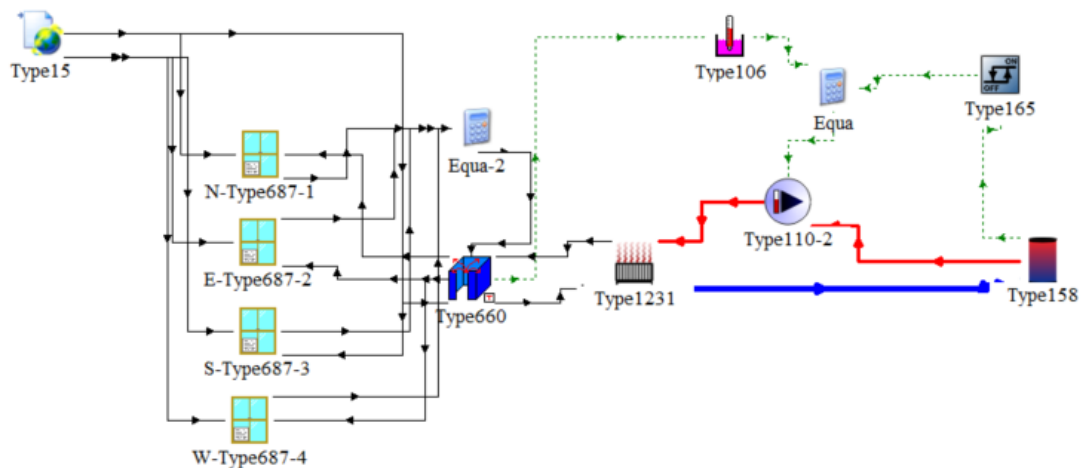
Modul konstantní tepelné ztráty

Zásobované bytové domy a jejich tepelné ztráty jsou stejné a v simulaci se chovají identicky. Modul Type 682 modeluje konstantní tepelnou ztrátu a je jím v simulaci zohledněno proměnné chování bytových domů. Modul reprezentuje dva z devíti bytových domů, které SCZT zásobuje. Pro systém CZT to znamená, že i v případě nulové potřeby tepla na vytápění bude od zbývajících sedmi bytových domů v období vytápění udržovaný neustálý odběr tepla odpovídající tepelné ztrátě dvou bytových domů za jmenovitých podmínek.

Domovní předávací stanice

Domovní předávací stanici reprezentuje modul Type 158. Ve skutečnosti se nejedná o výměník tepla jako v případě předávací stanice. Jedná se o zásobník teplé vody, který byl pro simulaci použit ze dvou důvodů. Jedním z nich je již zmíněný přenos tepla mezi dvěma okruhy, v tomto případě skrze teplotonosnou látku v zásobníku. Druhým důvodem je, že zásobník slouží jako jakýsi bezpečnostní prvek pro chod simulace. Pomáhá simulačnímu procesu, aby systém nedivergoval a simulace tak mohla bez vyhlášení chyb a následného vypnutí doběhnout až do konce simulačního času.

4.1.3 Spotřebitelský okruh



Obr. 12 Simulační schéma spotřebitelského okruhu

Spotřebitelský okruh je část soustavy CZT sahající od domovní předávací stanice až po samotné distribuční elementy tepla (otopné těleso). Teplo je v rámci jednoho spotřebitelského okruhu z domovní předávací stanice (Type 158) dopravováno do otopného tělesa (Type 1231). Potrubní rozvody nejsou uvažovány. Otopné těleso zastupuje celkovou otopnou plochu jednoho bytového domu (Type 660). Na budovu jsou přímo napojeny 4 moduly Type (687), které v simulaci modelují okna orientované na každou světovou stranu. Společně jsou pak okna i budova propojeny s modulem klimatických dat (Type 15).

Modul otopného tělesa

Pro modelování otopného tělesa je využit modul Type 1231. Modul reprezentuje celkovou otopnou plochu otopného systému v rámci jednoho bytového domu. Jeho parametry vychází z výpočtu, uvedeného ve výpočetním excelu (příloha PE1). Hlavními parametry jsou návrhový výkon, návrhová střední teplota otopné vody, návrhová teplota

okolního vzduchu a návrhový exponent. Problém s tímto modulem je takový, že zastaví a dále blokuje simulaci v případě, kdy otopným tělesem protéká otopná voda o teplotě menší, než je teplota okolního vzduchu v budově. Modul Type 165, který modeluje diferenciální regulátor zajistí, že při chodu čerpadla teplota vstupní otopné vody do otopného tělesa je vyšší než teplota okolního vzduchu v budově. Není-li tato podmínka splněna, regulátor nevyšle signál k zapnutí čerpadla. Pro zjednodušení je uvažován stejný typ otopného tělesa, tj. deskové otopné těleso pro všechny simulační scénáře.

Modul oběhového čerpadla

Modul oběhového čerpadla Type 110 je stejný v primárním i sekundárním okruhu. Čerpadlo je zde řízeno na základě vnitřní teploty vzduchu v budově. Modul Type 106 modeluje termostat, který na základě aktuální teploty vzduchu uvnitř v budově a nastavené žádané teploty uvnitř budovy vysílá řídicí signál (ON/OFF). Oběhové čerpadlo spíná na základě přijímaného řídicího signálu z modulu Type 106 a Type 165. Jejich řídicí signály jsou spojeny v modulu Type Equa logickou funkcí „and“. Znamená to, že oběhové čerpadlo je v režimu zapnuto jen v případě, že teplota vstupní otopné vody do otopného tělesa je vyšší než teplota okolního vzduchu a zároveň termostatem snímaná teplota v budově je nižší než požadovaná teplota.

Modul budovy

Osmipodlažní bytový dům je v simulaci reprezentován pomocí modulu Type 660. Jedná se o zjednodušený jednozónový model budovy bez prosklených částí. Jednotlivá patra v modelu nejsou zohledněna. V modulu je nutné zadat parametry součinitele tepelných ztrát prostupem, objem budovy, tepelné zisky od lidí a spotřebičů a tepelnou kapacitu budovy. Všechny bytové domy jsou totožné a definované stejnými parametry. Veškeré potřebné hodnoty a výpočty jsou uvedeny v příloženém výpočetním excelu (příloha PE1).

V sekundárním okruhu na Obr. 11 je modul s označením Type 6B. Tento modul symbolizuje makro, které v sobě obsahuje spotřebitelský okruh, který v simulaci reprezentuje šest bytových domů. Jedná se o multiplikaci (šestinásobek) spotřebitelského okruhu pro jeden bytový dům.

Modul oken

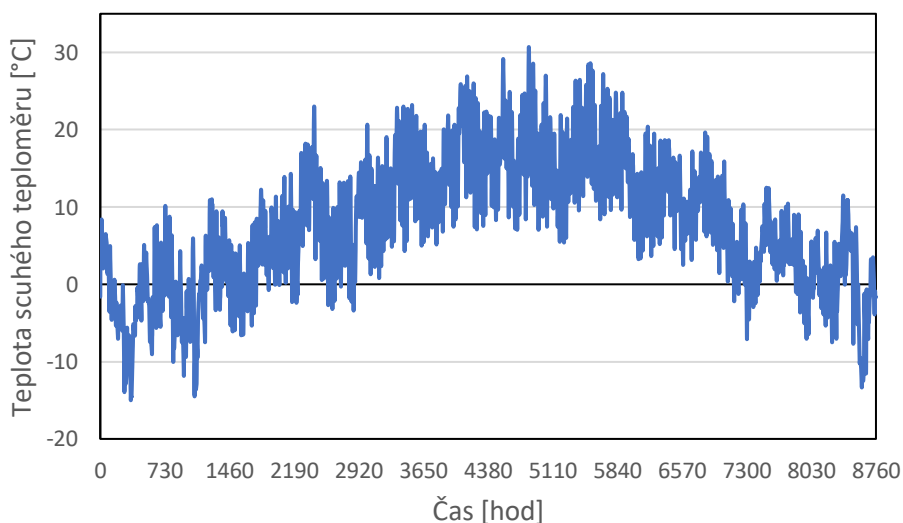
Modul Type 687 modeluje prosklené části budovy (okna). Modul v simulaci zohledňuje tepelné zisky prostupem i radiací. Každý ze čtyř modulů představuje prosklenou část orientovanou na jednu světovou stranu. Modul oken je nutné správně propojit s okrajovými podmínkami, které jsou popsány níže klimatickými daty (Type 15), které mimo venkovní teploty poskytují i informace o slunečním záření apod.

4.2 Okrajové podmínky

Pro porovnávání výstupů ze simulací a vyhodnocení návrhových scénářů studovaného případu CZT je nutné nastavit ve všech simulačních modelech stejné okrajové podmínky. V této podkapitole jsou popsány jednotlivé okrajové podmínky definující externí vstupy pro simulaci.

Modul klimatických dat

Modul Type 15 slouží pro načítání klimatických dat. Jsou vybrána klimatická data typického meteorologického roku pro Prahu z databáze TRNSYS. Ročního průběh teplot suchého teploměru pro Prahu je vidět v Grafu 8. Nejnižší teplota ze simulace je -15°C . Tato teplota je uvažována jako venkovní výpočtová tepla pro výpočty návrhu tepelného výkonu na vytápění, tepelných ztrát potrubních rozvodů nebo návrhu otopných těles. Hlavními výstupy z modulu klimatických dat, které je nutné správně v simulačním modelu propojit s příslušnými komponenty (modul oken Type 687, modul budovy Type 660 atd.) jsou teplota suchého teploměru, přímé a difúzní záření apod.



Graf 8 Roční průběh teplot suchého teploměru pro Prahu

Délka období vytápění

Z klimatických dat je určena délka období vytápění, kdy střední denní teplota venkovního vzduchu dva dny po sobě poklesne pod hodnotu 13 °C a neočekává se významné oteplení [65]. Rovnicí obsaženou v modulu Type Equa-4 na Obr. 10 je definována délka období vytápění, tj. provoz oběhových čerpadel a zdrojů tepla. Type Equa-4 vysílá řídicí signál oběhovým čerpadlům a zdrojům tepla na základě aktuálního simulačního času. Na základě rovnice (1) je stanovena délka období vytápění, resp. letní odstávka SCZT v simulačním čase od hodiny 3313 až do hodiny 6025.

$$\text{odstávka} = \text{and}(\text{ge}(\text{time}, 3313), \text{le}(\text{time}, 6025)) * 0 + \text{lt}(\text{time}, 3313) * 1 + \text{gt}(\text{time}, 6025) * 1 \quad (1)$$

Tepelné zisky od vnitřních zdrojů

V simulaci jsou uvažovány tepelné zisky od vnitřních zdrojů dle [71]. Jedná se o zjednodušenou metodu výpočtu vycházející z EN ISO 13790. Budova je uvažována jako jedna zóna s jednou teplotou.

Vnitřní zisky se stanoví podle projektovaného obsazení domu osobami. Koeficient přítomnosti osob se uvažuje 0,7. Uvolňované teplo do prostoru od spotřebičů, umělého osvětlení a metabolické teplo se uvažuje 100 W/osobu a ještě se připočítá 100 W na bytovou jednotku. Vnitřní zisky jednoho bytu se stanoví dle:

$$Q_i = (0,7 \cdot k \cdot 100 + 100) \cdot t \quad \text{ve Wh}$$

kde jsou

Q_i vnitřní zisky

k počet osob v budově (uvažuje se 80)

t časový usek

Do modulu budovy Type 660 se zadává pouze hodnota v závorce a simulace dále dopočítá vnitřní zisky ve zvoleném časovém kroku.

Teplota uvnitř budovy (zóny)

Pro všechny scénáře v simulačních modelech je stanovena stejná hodnota žádané teploty vzduchu uvnitř zóny. Na termostatu Type 106, který snímá teplotu vzduchu uvnitř v budově Type 660 je tato žádaná teplota nastavena na 20 °C.

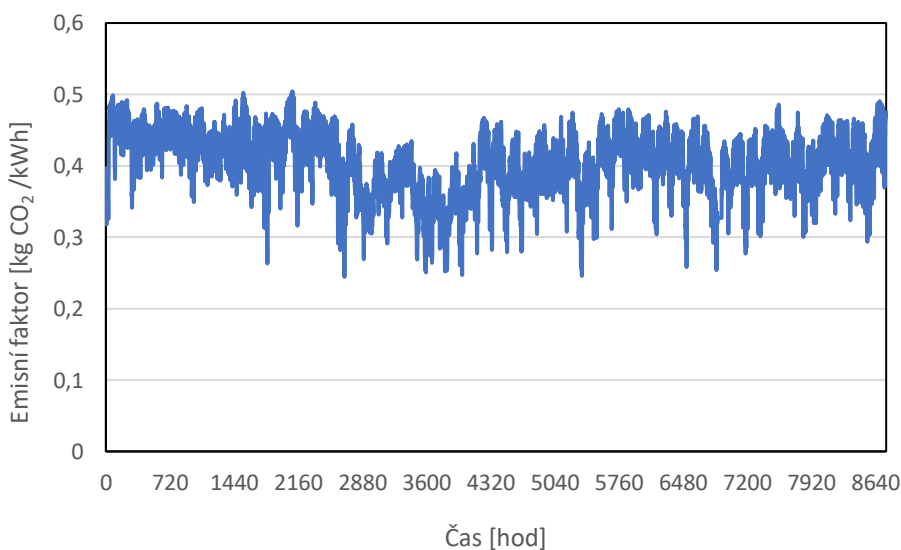
Vstupní koeficienty/intenzity emisí CO₂

Pro výpočet množství vyprodukovaných emisí CO₂ při spalování daného paliva (energonositele) jsou uvažovány emisní faktory pro ČR z Tab. 7. Důležité zmínit, že uvedené emisní faktory se vztahují k energii přivedené v palivu a nikoli k produkci energie. Ve výpočtu je nutné uvažovat účinnost energetické přeměny (spalování) [60].

Tab. 7 Emisní faktory – upraveno z [15]

Druh paliva	Emisní faktor tCO ₂ /MWh výhřevnosti paliva
Hnědé uhlí	0,36
Černé uhlí	0,33
Těžký topný olej	0,27
Lehký topný olej	0,26
Zemní plyn	0,2
Biomasa	0

Pro vyhodnocení množství vyprodukovaných emisí CO₂ v rámci elektrické energie jsou použita poskytnutá hodinová data profilu intenzity CO₂ pro ČR z roku 2019. Data zohledňují dynamickou složku energetického mixu. Profil intenzity CO₂ je zobrazen na Grafu 9. Průměrná roční hodnota emisního faktoru pro elektrickou energii z poskytnutých dat je **0,41 kg CO₂ ekv./kWh**.

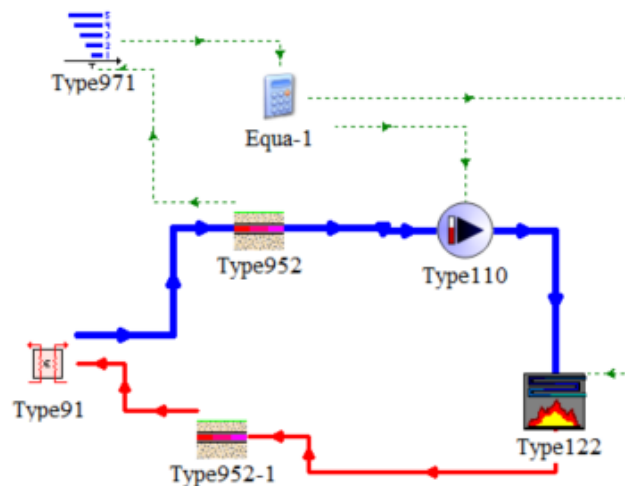


Graf 9 Profil intenzity CO₂ pro rok 2019 v ČR

4.3 Konvenční CZT (1.scénář)

Model 1. scénáře modeluje studovaný případ systému CZT. Jak je již zmíněno v kapitole 3.1, jedná se o teplovodní SCZT, která zásobuje teplem na vytápění skupinu devíti osmipodlažních bytových domů s rokem výstavby 1977. Centrálním zdrojem tepla je výtopna spalující uhlí. Na základě [27] byl ve spotřebitelském okruhu zvolen navrhovaný teplotní spád pro otopnou soustavu 70/60 °C. Navrhovaný teplotní spád pro primární okruh je 90/65 °C a pro sekundární okruh 72/60 °C [66]. Teplota přívodní otopné vody v sekundárním okruhu je o 2 °C vyšší než teplota přívodní otopné vody ve spotřebitelském okruhu. Tento rozdíl teplot je simulací ověřen, že je dostatečný pro pokrytí poklesu teploty otopné vody v potrubí vlivem tepelných ztrát.

Na Obr. 13 je vidět simulační schéma primárního okruhu 1. scénáře. Oproti primárnímu okruhu základního modelu jde zde navíc modul Type 971, který sekvenčně řídí oběhové čerpadlo na základě snímané teploty vratné otopné vody.



Obr. 13 Simulační schéma primárního okruhu 1. scénáře

Modul řízení oběhového čerpadla

Modul Type 971 v simulaci reprezentuje n-stupňový diferenciální regulátor s n – výstupy ON/OFF řídicích signálů. V modulu se definují žádané hodnoty sledované veličiny a pásma citlivosti pro každou úroveň. Regulátor na základě aktuální odchylky sledované veličiny od žádaných hodnot vysílá řídicí signál odpovídající n-té definované úrovni. V tomto případě se jedná o osmistupňový regulátor. Sledovanou veličinou je teplota otopné vody ve vratném potrubí před vstupem do zdroje tepla. Každé úrovni odpovídá na základě rovnice obsažené v Type Equa-1 příslušný podíl jmenovitého průtoku oběhového čerpadla. Například když je teplota otopné vody ve vratném potrubí

větší nebo rovna 66 °C a žádaná teplota vratné otopné vody je podle návrhového teplotního spádu 60 °C, vysílaný řídicí signál z Type Equa-1 je 0,45. Znamená to, že oběhové čerpadlo snížením otáček sníží průtok otopné vody na 45 % svého jmenovitého průtoku.

V následujících tabulkách jsou uvedeny hlavní parametry SCZT pro 1. scénář.

Tab. 8 Hlavní parametry SCZT pro 1. scénář

Spotřebitelský okruh 1 budova	
Typ budovy	Bytový dům
Počet pater [-]	8
Počet bytů [-]	32
Vytápěná plocha [m ²]	3200
Počet obyvatel [-]	80
Podíl zasklení na obvodových stěnách [%]	30
Otopný systém	Otopné těleso (deskové)
Návrhový teplotní spád OT [°C]	70/60
Jmenovitý průtok soustavou [kg/s]	2,68
Požadovaná vnitřní teplota [°C]	20
Venkovní výpočtová teplota [°C]	-15
Celková součinitel tepelných ztrát prostupem [W/K]	4804
Celková tepelná ztráta 1 bytového domu [kW]	168
Celková tepelná ztráta 9 bytového domu [kW]	1513

Primární okruh CZT	
Zdroj tepla	Kotel na uhlí
Účinnost zdroje [%]	78
Teplotní spád [°C]	90/65
Jmenovitý průtok okruhem [kg/s]	16,2

Sekundární okruh CZT	
Teplotní spád [°C]	72/60
Jmenovitý průtok okruhem [kg/s]	32,9

Provoz systému

Centrální zdroj tepla ohřívá otopnou vodu na požadovanou výstupní teplotu 90 °C po celou dobu provozu v období vytápění. Primární okruh je navržen tak, aby teplota otopné vody vracející se zpět do zdroje neklesla pod 55 °C. Jako zdroj tepla je uvažován kotel, který není kondenzační. Teplota 55 °C se bere jako bezpečná teplota pro ochranu zdroje tepla před nízkoteplotní korozi [67]. Zdroj tepla a oběhová čerpadla primárního a sekundárního okruhu jsou v průběhu období vytápění nepřetržitě v provozu. Regulace spotřebitelských okruhů je popsána v kapitole 4. 1. 3.

V Tab. 9 jsou uvedeny hlavní parametry modulů simulace v jednotlivých okruzích SCZT pro 1. scénář.

Tab. 9 Hlavní parametry modulů v simulaci 1. scénáře

Okruh	Modul	Komponenta	Parametr	Hodnota	Jednotky
Prim. okruh	Type 122	Zdroj tepla	Jmenovitý výkon	1739	kW
			Min. podíl výkonu	0,2	-
			Žádaná teplota otop. vody na výstupu	90	°C
	Type 952	Potrubí přívodní/ vratné	Celková délka	3,4	km
			Rozměr DN	125	-
			Tloušťka izolace	21	mm
Type 91	Výměník tepla	Účinnost výměníku	0,857	-	
Type 110	Čerpadlo	Jmenovitý průtok	13,45	kg/s	
Sekund. okruh	Type 952	Potrubí přívodní/ vratné	Celková délka	5,4	km
			Rozměr DN	150	-
			Tloušťka izolace	21	mm
	Type 647	Hlavní rozdělovač	Počet rozdělovacích odboček	3	-
			Dělicí poměr 1. odbočky	0,21	-
			Dělicí poměr 2. odbočky	0,12	-
	Type 682	Konst. tep. ztráta	Dělicí poměr 3. odbočky	0,67	-
Tepelná ztráta (2 bytové domy)			336	kW	
Type 110	Čerpadlo	Jmenovitý průtok	23,3	kg/s	
Spotřeb. okruh 1 budova	Type 1231	Otopné těleso	Návrhový výkon	168	kW
			Návrhová vnitřní teplota	20	°C
			Návrhová střední teplota otop. vody	65	°C
			Exponent n	1,4	-
	Type 110	Čerpadlo	Jmenovitý průtok	4,02	kg/s
	Type 106	Termostat	Žádaná teplota	20	°C
	Type 660	Budova	Souč. tep. ztrát prostupem – bez oken	1800	W/K
			Objem budovy	6000	m ³
			Tepelná kapacita	405060	kJ/K
			Tepelné zisky od lidí	20160	kJ/hr
	Type 687	Okna	Tepelné zisky od spotřebičů	11520	kJ/hr
Celková plocha			648	m ²	
Součinitel prostupu tepla			3,7	W/m ²	
			Součinitel solárních tepelných zisků	0,62	-

4.4 CZT s progresivním úsporným opatřením (2. scénář)

Model 2. scénáře simuluje situaci, kdy jsou budovy studovaného případu zrekonstruované, provozní teploty v celé soustavě CZT jsou nižší a stávající uhelné palivo se nahradí zemním plynem. Obvodové stěny a střechy budov jsou vybaveny tepelnou izolací EPS o tloušťce 20 cm a původní dřevěná okna s jednoduchým

zasklením jsou nahrazena izolačními okny s trojskly. Návrhový teplotní spád otopné soustavy je snížen na 50/40 °C [27]. Návrhový teplotní spád primárního okruhu je 65/45 °C a sekundárního okruhu 52/40 °C [66]. Potrubní systém a otopná tělesa jsou původní.

V následujících tabulkách jsou uvedeny hlavní parametry SCZT pro 2. scénář.

Tab. 10 Hlavní parametry SCZT pro 2. scénář

Spotřebitelský okruh 1 budova	
Typ budovy	Bytový dům
Počet pater [-]	8
Počet bytů [-]	32
Vytápěná plocha [m ²]	3200
Počet obyvatel [-]	80
Podíl zasklení na obvodových stěnách [%]	30
Otopný systém	Otopné těleso (deskové)
Návrhový teplotní spád OT [°C]	50/40
Jmenovitý průtok soustavou [kg/s]	1,36
Požadovaná vnitřní teplota [°C]	20
Venkovní výpočtová teplota [°C]	-15
Celková součinitel tepelných ztrát prostupem [W/K]	1624
Celková tepelná ztráta 1 bytového domu [kW]	57
Celková tepelná ztráta 9 bytového domu [kW]	512

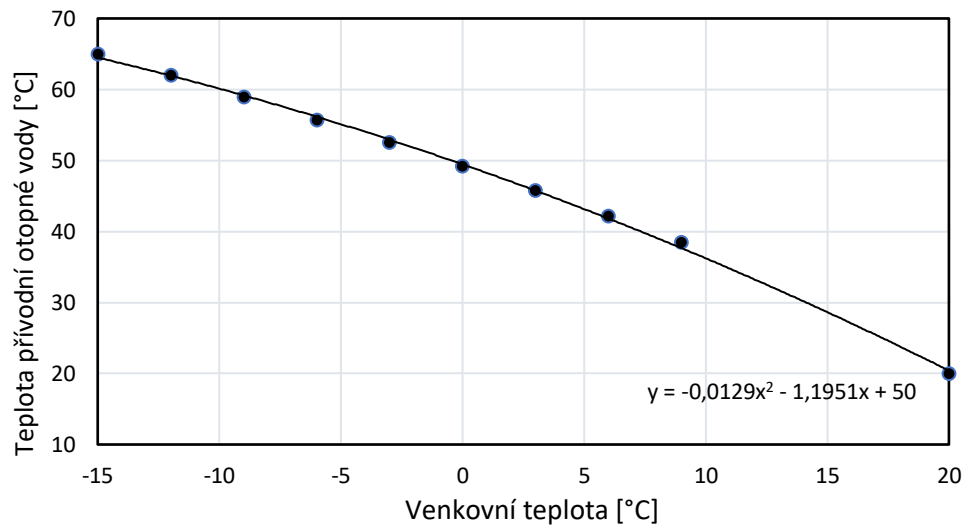
Primární okruh CZT	
Zdroj tepla	Kotel na zemní plyn
Účinnost zdroje [%]	98
Teplotní spád [°C]	65/45
Jmenovitý průtok okruhem [kg/s]	7,8

Sekundární okruh CZT	
Teplotní spád [°C]	52/40
Jmenovitý průtok okruhem [kg/s]	12,3

Provoz systému

Žádaná teplota výstupní otopné vody ze zdroje tepla není v tomto případě konstantní, ale mění se v závislosti na venkovní teplotě. Zdroj tepla, resp. jeho tepelný výkon je řízen tzv. ekvitermní regulací [67]. Ekvitermní regulace spočívá v řízení výkonu zdroje tepla podle nastavené ekvitermní křivky, která ukazuje závislost přívodní otopné vody na venkovní teplotě [68]. S klesající venkovní teplotou narůstá teplota přívodní otopné vody podle ekvitermní křivky. Naopak s vyššími venkovními teplotami teplota přívodní otopné vody klesá. Pro teplotní spád primárního okruhu 65/45 °C

a vnitřní teplotu v budově 20 °C byla pomocí online pomůcky [69] sestrojena ekvitermní křivka viz Graf 10.



Graf 10 Ekvitermní křivka pro teplotní spád 65/45 °C a vnitřní teplotu 20 °C – upraveno z [69]

V modulu Type Equa-4 (kalkulačka) viz Obr. 16 v kapitole 4. 1. 1 je pomocí následující rovnice (2) definován předpis funkce ekvitermní křivky uvedený na Grafu 10. Modul mění v čase hodnotu žádané teploty výstupní otopné vody ze zdroje tepla. Rovnice zároveň omezuje minimální teplotu výstupní otopné vody na hodnotu 45 °C. Podle ekvitermní křivky teplotě výstupní otopné vodě 45 °C odpovídá venkovní teplota 4°C.

$$t_{\text{setpoint}} = \text{gt}(t_{\text{ambient}}, 4) * 45 + \text{le}(t_{\text{ambient}}, 4) * (-0,0129 * t_{\text{ambient}} * t_{\text{ambient}} - 1,1951 * t_{\text{ambient}} + 50) \quad (2)$$

Simulační nastavení provozu oběhových čerpadel primárního a sekundárního okruhu a regulace spotřebitelských okruhů odpovídá základnímu modelu.

V Tab. 11 jsou uvedeny hlavní parametry modulů simulace v jednotlivých okruzích SCZT pro 2. scénář.

Tab. 11 Hlavní parametry modulů v simulaci 2. scénáře

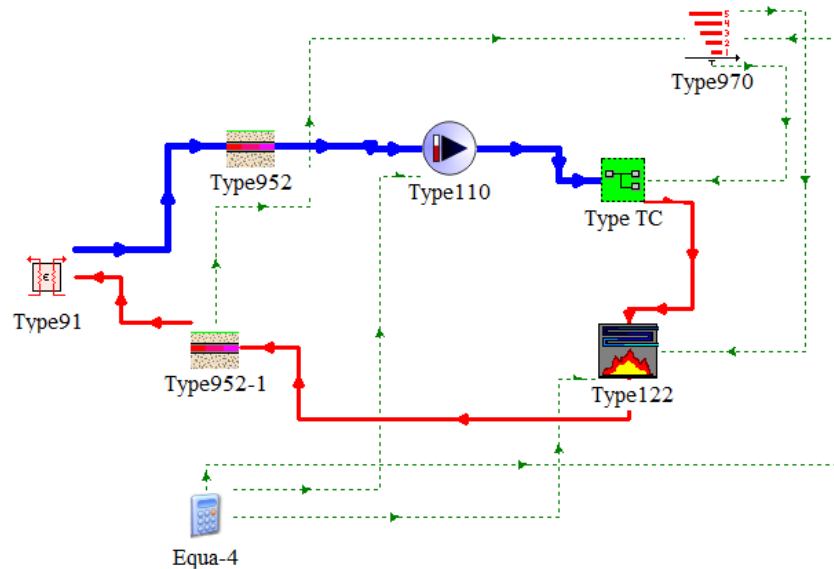
Okruh	Modul	Komponenta	Parametr	Hodnota	Jednotky
Prim. okruh	Type 122	Zdroj tepla	Jmenovitý výkon	687	kW
			Min. podíl výkonu	0,2	-
	Type 952	Potrubí přívodní/ vratné	Celková délka	3,4	km
			Rozměr DN	125	-
			Tloušťka izolace	21	mm
Type 91	Výměník tepla	Účinnost výměníku	0,8	-	
Type 110	Čerpadlo	Jmenovitý průtok	7,3	kg/s	
Sekund. okruh	Type 952	Potrubí přívodní/ vratné	Celková délka	5,4	km
			Rozměr DN	150	-
			Tloušťka izolace	21	mm
	Type 647	Hlavní rozdělovač	Počet rozdělovacích odboček	3	-
			Dělicí poměr 1. odbočky	0,21	-
			Dělicí poměr 2. odbočky	0,12	-
			Dělicí poměr 3. odbočky	0,67	-
Type 682	Konst. tep. ztráta	Tepelná ztráta (2 bytové domy)	112	kW	
Type 110	Čerpadlo	Jmenovitý průtok	11,76	kg/s	
Spotřeb. okruh 1 budova	Type 1231	Otopné těleso	Návrhový výkon	56,8	kW
			Návrhová vnitřní teplota	20	°C
			Návrhová střední teplota otop. vody	45	°C
			Exponent n	1,4	-
	Type 110	Čerpadlo	Jmenovitý průtok	1,36	kg/s
	Type 106	Termostat	Žádaná teplota	20	°C
	Type 660	Budova	Souč. tep. ztrát prostupem – bez oken	499,5	W/K
			Objem budovy	6000	m ³
			Tepelná kapacita	405060	kJ/K
			Tepelné zisky od lidí	20160	kJ/hr
	Type 687	Okna	Tepelné zisky od spotřebičů	11520	kJ/hr
Celková plocha			648	m ²	
Součinitel prostupu tepla			0,8	W/m ²	
			Součinitel solárních tepelných zisků	0,21	-

4.5 Částečně/plně elektrifikované CZT s progresivním úsporným opatřením (3. a 4. scénář)

Model 3. scénáře modifikuje situaci 2. scénáře tak, že primárním centrálním zdrojem tepla jsou dvě tepelná čerpadla typu vzduch – voda a jako špičkový zdroj tepla slouží kotel na zemní plyn. Jednotlivé zdroje tepla jsou sériově uspořádány. Návrhové teplotní

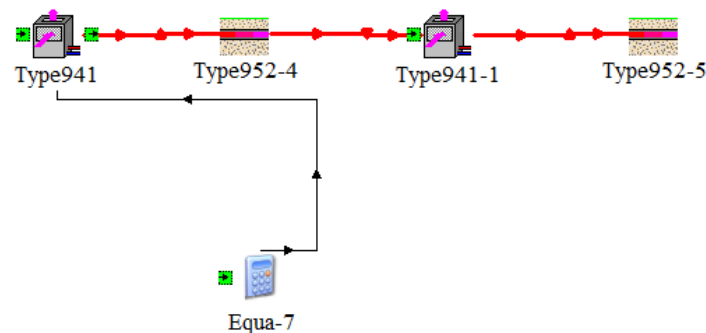
spády jsou v jednotlivých okruzích SCZT stejné, tj. v primárním okruhu 65/45 °C, sekundárním okruhu 52/40 °C a otopná soustava ve spotřebitelském okruhu 50/40 °C. Schéma 3. scénáře je zobrazeno na Obr. 14.

Model 4. scénáře a jeho parametry jsou shodné se 3. scénářem. Změna je pouze v typu špičkového zdroje tepla, kde namísto kotle na zemní plyn je elektrokotel.



Obr. 14 Simulační schéma primárního okruhu 3. scénáře

Pro větší přehlednost a propojení jednotlivých modulů jsou tepelná čerpadla uložena do makra v modulu Type TC viz obrázek níže.



Obr. 15 Makro Type TC

Modul tepelného čerpadla

Pro modelování TČ je použit modul Type 941. Jedná se o jednostupňové tepelné čerpadlo typu vzduch – voda. Teplo je na primární straně (vzduch) odnímáno okolnímu vzduchu a přes tepelné čerpadlo je převedeno na vyšší teplotní hladinu pro účel vytápění na straně sekundární (voda). Tento modul vychází z datových souborů

dodaných uživatelem, které obsahují katalogové údaje (tepelný výkon, elektrický příkon) od výrobce. Je důležité vytvořit datový soubor podle přesně definované struktury. Vzor datového souboru je v dokumentaci TRNSYSu [62]. Pro simulaci je vytvořen příložený datový soubor (s názvem catalog_data.txt), který vychází z dat TČ WAMAK AW 140 EVI viz příloha (P2). Jedná se o vysokoteplotní TČ s maximální teplotou vody na výstupu 65 °C. Pro jmenovité podmínky (A2 °C/W35 °C) je tepelný výkon 140 kW. Výrobce udává doporučený teplotní rozdíl na primární straně mezi vstupem a výstupem 5 °C a sekundární straně 7 °C [70]. Obě TČ v sérii svými technickými parametry odpovídají tepelnému čerpadlu WAMAK AW 140 EVI. Řízení je pouze ON/OFF.

Modul kaskádového regulátoru

Modul Type 970 v simulaci reprezentuje n-stupňový diferenciální regulátor s n – výstupy ON/OFF řídicích signálů. Pracuje na stejném principu jako modul Type 971 (kapitola 4. 3) jen s tím rozdílem, že Type 970 je určen k vytápění, a ne k chlazení. Regulátor slouží k řízení topných systémů s více zdroji tepla. V tomto případě se jedná o třístupňový regulátor. Sledovanou veličinou je teplota otopné vody v přívodním potrubí na vstupu do předávací stanice.

V následujících tabulkách jsou uvedeny hlavní parametry SCZT pro 3. scénář.

Tab. 12 Hlavní parametry SCZT pro 3. a 4. scénář

Spotřebitelský okruh 1 budova	
Typ budovy	Bytový dům
Počet pater [-]	8
Počet bytů [-]	32
Vytápěná plocha [m ²]	3200
Počet obyvatel [-]	80
Podíl zasklení na obvodových stěnách [%]	30
Otopný systém	Otopné těleso (deskové)
Návrhový teplotní spád OT [°C]	50/40
Jmenovitý průtok soustavou [kg/s]	1,36
Požadovaná vnitřní teplota [°C]	20
Venkovní výpočtová teplota [°C]	-15
Celková součinitel tepelných ztrát prostupem [W/K]	1624
Celková tepelná ztráta 1 bytového domu [kW]	57
Celková tepelná ztráta 9 bytového domu [kW]	512

Primární okruh CZT	
Primární zdroj tepla	Tepelná čerpadla vzduch-voda
Špičkový zdroj tepla pro 3. scénář	Kotel na zemní plyn
Účinnost špičkového zdroje [%]	98
Špičkový zdroj tepla pro 4. scénář	Elektrokotel
Účinnost špičkového zdroje [%]	100
Teplotní spád [°C]	65/45
Jmenovitý průtok okruhem [kg/s]	7,8

Sekundární okruh CZT	
Teplotní spád [°C]	52/40
Jmenovitý průtok okruhem [kg/s]	12,3

Provoz systému

Obě tepelná čerpadla a špičkový zdroj tepla jsou sériově propojeny a podle potřeby je v provozu určitý počet zdrojů tepla. Stejně jako ve 2. scénáři je v tomto případě aplikována ekvitermní regulace primárního okruhu. Ekvitermní křivka je stejná.

Níže vypsání rovnice (4) až (6) představují žádané hodnoty kaskádového regulátoru.

$$t_{\text{setpoint}} = g(t_{\text{ambient}}, 4) * 45 + l_e(t_{\text{ambient}}, 4) * (-0,0129 * t_{\text{ambient}} * t_{\text{ambient}} - 1,1951 * t_{\text{ambient}} + 50) \quad (3)$$

$$S_1 = t_{\text{setpoint}} + 1 \quad (4)$$

$$S_2 = t_{\text{setpoint}} + 0,5 \quad (5)$$

$$S_3 = t_{\text{setpoint}} \quad (6)$$

Rovnice (3), představující ekvitermní křivku je shodná s rovnicí (1). Výsledek rovnice (4) odpovídá aktuální žádané teplotě přívodní otopné vody dle ekvitermní křivky navýšené o 1 °C. Je-li aktuální sledovaná teplota otopné vody před předávací stanicí nižší, regulátor vyšle prvnímu tepelnému čerpadlu signál k zapnutí. Tepelné čerpadlo bude zapnuté do doby, než bude sledovaná teplota rovna žádané teplotě. Při překročení žádané teploty regulátor zdroj vypne. Stejný princip platí pro řízení druhého tepelného čerpadla podle rovnice (5) a pro řízení špičkového zdroje tepla podle rovnice (6). V přechodových měsících je hlavní tepelné čerpadlo vypnuté a běží podle potřeby druhé tepelné čerpadlo a špičkový zdroj tepla. Simulační nastavení provozu oběhových čerpadel primárního a sekundárního okruhu a regulace spotřebitelských okruhů odpovídá předcházejícím scénářům.

V Tab. 13 jsou uvedeny hlavní parametry modulů simulace v jednotlivých okruzích SCZT pro 3. a 4. scénář.

Tab. 13 Hlavní parametry modulů v simulaci 3. a 4. scénáře

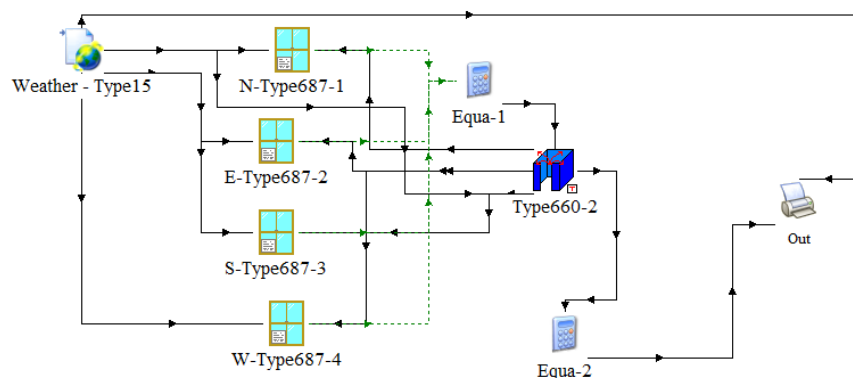
Okruh	Modul	Komponenta	Parametr	Hodnota	Jednotky
Prim. okruh	Type 122	Zdroj tepla	Jmenovitý výkon	407	kW
			Min. podíl výkonu	0,2	-
	Type 941	Tepelné čerpadlo	Jmenovitý výkon (A2/W35 °C)	140	kW
			Elektrický příkon	36,84	kW
			Celkový průtok vzduchu	40000	m ³ /hod
	Type 941-1	Tepelné čerpadlo	Jmenovitý výkon	140	kW
			Elektrický příkon	36,84	kW
			Celkový průtok vzduchu	40000	m ³ /hod
	Type 952	Potrubí přívodní/vratné	Celková délka	3,4	km
			Rozměr DN	125	-
Tloušťka izolace			21	mm	
Type 91	Výměník tepla	Účinnost výměníku	0,8	-	
Type 110	Čerpadlo	Jmenovitý průtok	7,3	kg/s	
Sekund. okruh	Type 952	Potrubí přívodní/vratné	Celková délka	5,4	km
			Rozměr DN	150	-
			Tloušťka izolace	21	mm
	Type 647	Hlavní rozdělovač	Počet rozdělovacích odboček	3	-
			Dělicí poměr 1. odbočky	0,21	-
			Dělicí poměr 2. odbočky	0,12	-
	Type 682	Konst. tep. ztráta	Tepelná ztráta (2 bytové domy)	112	kW
Type 110	Čerpadlo	Jmenovitý průtok	11,76	kg/s	
Spotřeb. okruh 1 budova	Type 1231	Otopné těleso	Návrhový výkon	56,8	kW
			Návrhová vnitřní teplota	20	°C
			Návrhová střední teplota otop. vody	45	°C
			Exponent n	1,4	-
	Type 110	Čerpadlo	Jmenovitý průtok	1,36	kg/s
	Type 106	Termostat	Žádaná teplota	20	°C
	Type 660	Budova	Souč. tep. ztrát prostupem – bez oken	499,5	W/K
			Objem budovy	6000	m ³
			Tepelná kapacita	405060	kJ/K
			Tepelné zisky od lidí	20160	kJ/hr
	Type 687	Okna	Tepelné zisky od spotřebičů	11520	kJ/hr
Celková plocha			648	m ²	
Součinitel prostupu tepla			0,8	W/m ²	
		Součinitel solárních tepelných zisků	0,21	-	

5. Ověření kvality modelu

Vzhledem ke komplexnosti simulačních modelů a počtu definovaných parametrů je vhodné ověřit kvalitu vytvořených modelů. Porovnáním výstupů ze simulace s výsledky z výpočtů nebo v případě TČ s katalogovými hodnotami od výrobce lze posoudit správnost a přesnost modelů.

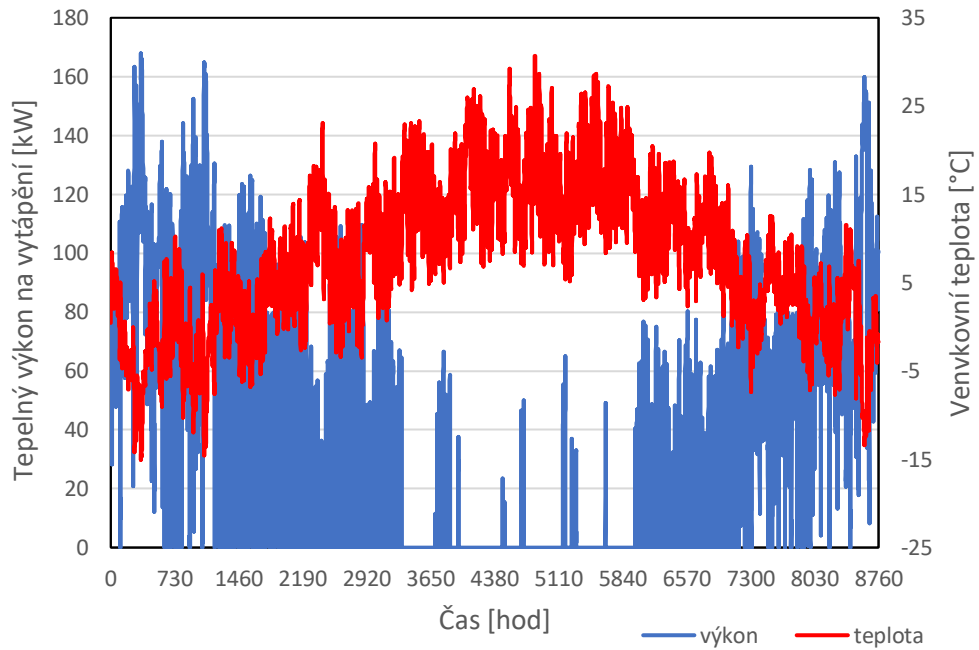
5.1 Tepelný výkon na vytápění budovy

Pro výpočet stanovení potřebného tepelného výkonu na vytápění budovy byly použity vztahy uvedené v [72]. Z výpočtu studovaného případu vychází, že návrhový tepelný výkon na vytápění pro jeden bytový dům činí **168,1 kW**. Pro simulaci potřebného tepelného výkonu byl vytvořen pomocný model viz Obr. 16. Pomocný model simuluje případ budovy s ideálním zdrojem tepla, který dodává do budovy přesně tolik tepla, kolik je potřeba na udržení požadované vnitřní teploty [62]. Budova je propojena s klimatickými daty pro Prahu.



Obr. 16 Pomocný model pro simulaci potřebného výkonu na vytápění

Z výstupů simulace (modul Type Out) byl vytvořen Graf 11, který zobrazuje roční průběh tepelného výkonu potřebného na vytápění a venkovní teploty. Maximum tepelného výkonu odpovídá venkovní výpočtové teplotě (-15 °C) a je rovno **167,84 kW**. Výsledky ze simulace a výpočtu se tak liší o méně než 1 %.



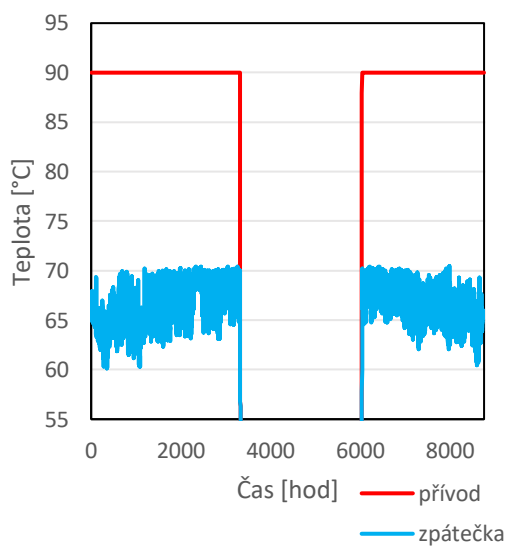
Graf 11 Roční průběh tepelného výkonu na vytápění a venkovní teploty

Analogicky byl ověřen i potřebný tepelný výkon na vytápění pro budovu, která prošla rekonstrukcí (zateplení obálky a výměna oken). Vypočtená hodnota tepelného výkonu na vytápění je **56,84 kW** a hodnota ze simulace je **56,47 kW**. Rozdíl je znovu menší než 1 %.

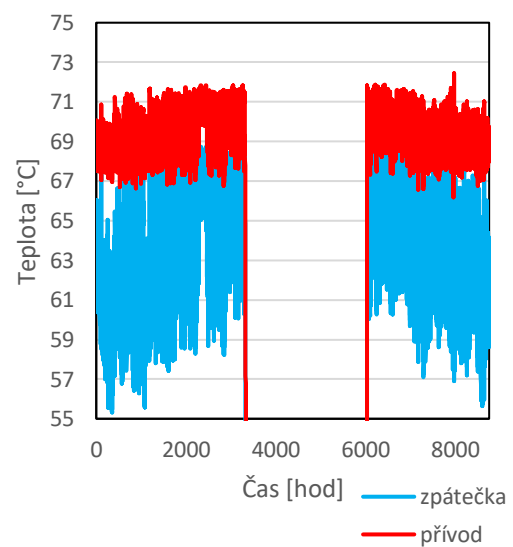
5.2 Teplotní spády a žádaná teplota v budově

Dále bylo ověřeno, zda byla v budovách dosažena požadovaná vnitřní teplota (20 °C) a jestli teplota otopné vody v primárním a sekundárním okruhu odpovídá návrhovému teplotním spádům. V simulaci se uvažuje, že SCZT je v provozu pouze po dobu období vytápění. Mimo období vytápění není zajištěna dodávka tepla, a tedy požadavky na vnitřní komfort nejsou/nemohou být zajištěny.

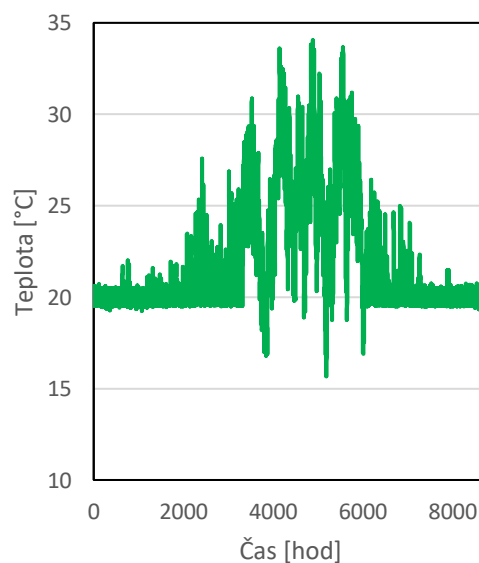
Návrhový teplotní spád **1. scénáře** je pro primární okruh 90/65 °C a pro sekundární okruh 72/60 °C. Roční průběh teplot ze simulace je vidět na grafech níže. Kolísání teplot je dané proměnlivým odběrem tepla, venkovní teplotou a souvisejícím sekvenčním zregulováním jednotlivých okruhů v rámci dynamické simulace. Teplota zpáteční otopné vody v sekundárním okruhu vykazuje největší odchylky od návrhové teploty. Když je čerpadlo vypnuté, otopná voda neodevzdá své teplo a s vysokou teplotou se vrací zpět do předávací stanice. Regulační soustava v primárním okruhu takto obsáhlého systému nedokáže na časté spínání rychle reagovat. Teploty se kromě této výjimky pohybují maximálně v rozmezí ± 5 °C od návrhových hodnot.



Graf 12 Primární okruh 90/65 °C

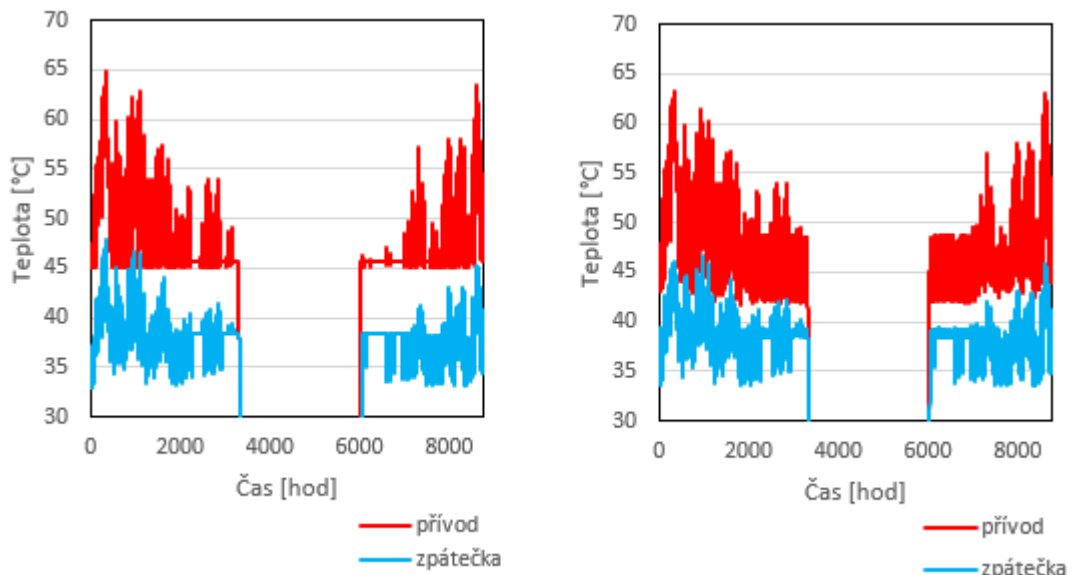


Graf 13 Sekundární okruh 72/55 °C

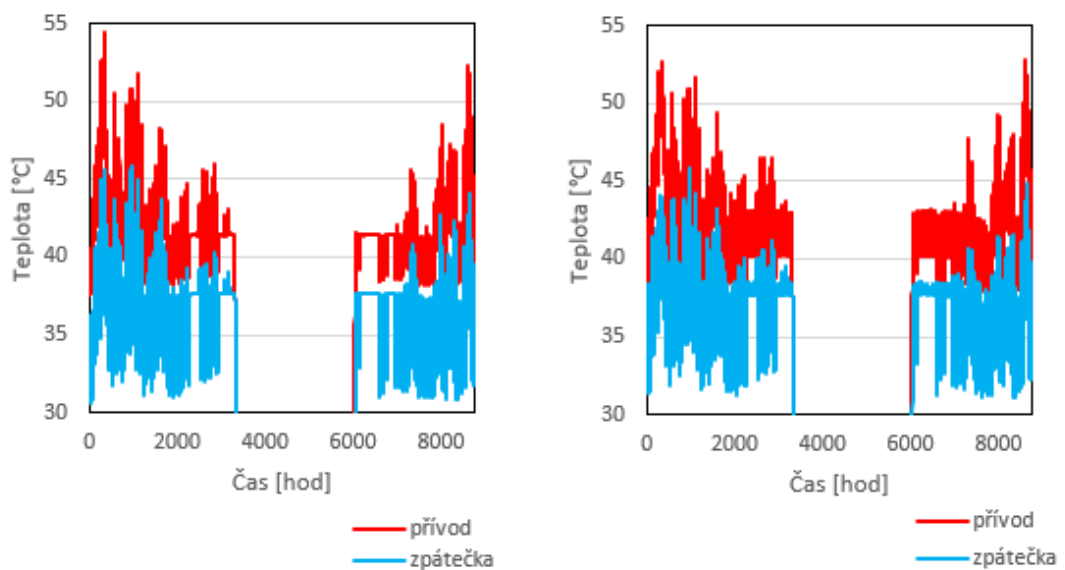


Graf 14 Teplota uvnitř v budově – žádaná 20 °C

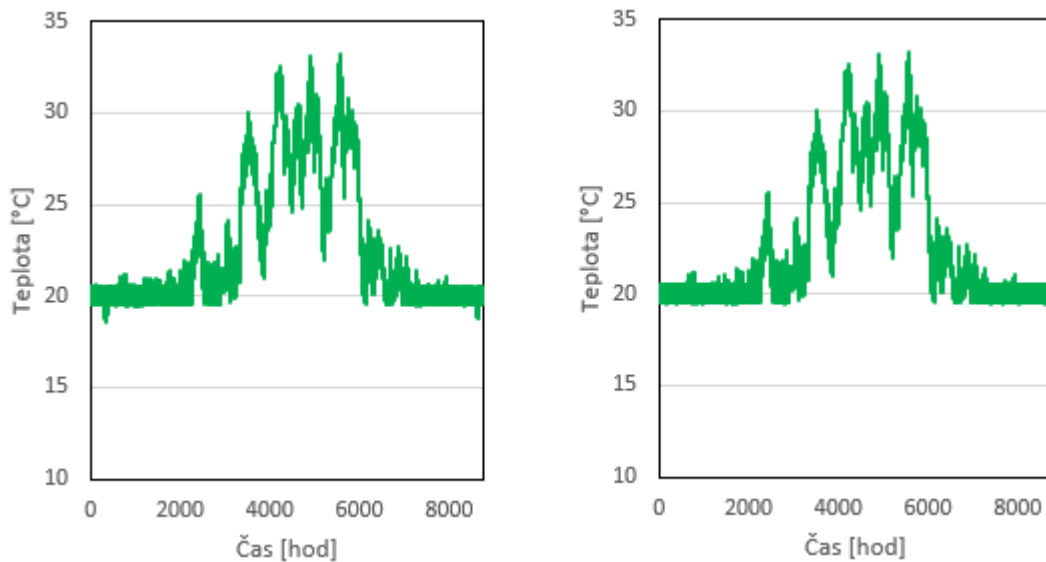
Teplotní spád **2. až 4. scénáře** je pro primární okruh 65/45 °C a pro sekundární okruh 52/40 °C. Jak je již zmíněno v kapitole 4., systémy obou scénářů jsou řízeny ekvitermní regulací s omezením na minimální teplotu přívodní otopné vody 45 °C. Teplota přívodní otopné vody, resp. teplotní spád se v průběhu otopné sezóny mění v závislosti na venkovní teplotě. Na grafech níže jsou zobrazeny průběhy reprezentativních teplot otopné vody a vnitřního prostředí v zóně. Grafy 3. a 4. scénáře jsou shodné.



Graf 15 Primární okruh 65/45 °C (vlevo 2. scénář; vpravo 3. a 4. scénář)



Graf 16 Sekundární okruh 52/40 °C (vlevo 2. scénář; vpravo 3. a 4. scénář)



Graf 17 Teplota uvnitř v budově – žádaná 20 °C (vlevo 2. scénář; vpravo 3. a 4. scénář)

5.3 Kontrola provozu tepelného čerpadla

Zvolený model TČ pracuje na základě výkonostní charakteristiky vložené externě uživatelem. Tato charakteristika se zpracovává z katalogových hodnot od výrobce. Správnost nastavení modelu bylo nutné ověřit, a to srovnáním výstupních tepelných výkonů, příkonu a topného faktoru ze simulace s uvedenými hodnotami od výrobce. Katalogové hodnoty jsou uvedeny v příloze (P2). Pro vybrané teploty venkovního vzduchu je v Tab. 14 vidět srovnání tepelného výkonu, elektrického příkonu a COP hodnot pro výstupní teplotu 45 °C z TČ. Z tabulky je zřejmé, že hodnoty jsou téměř shodné a lze tedy konstatovat, že TČ v simulaci vykazuje chování, které je v souladu s hodnotami z katalogu od výrobce. Dále byl ověřen teplotní rozdíl na vstupu a výstupu otopné vody z TČ. Doporučený návrhový rozdíl teplot je 5 °C. Průměrný rozdíl ze simulace je 4,34 °C.

Tab. 14 Porovnání výstupních hodnot ze simulace s katalogovými hodnotami

Výstup z:	Venkovní teplota [°C]	Tepelný výkon [kW]	El. Příkon [kW]	COP [-]
simulace	-15	102,90	48,28	2,13
katalog		102,08	45,35	2,25
simulace	-5	125,06	45,12	2,77
katalog		125,35	44,87	2,79
simulace	0	134,35	45,74	2,94
katalog		134,39	45,68	2,94
simulace	5	154,63	44,51	3,47
katalog		155,42	42,45	3,66

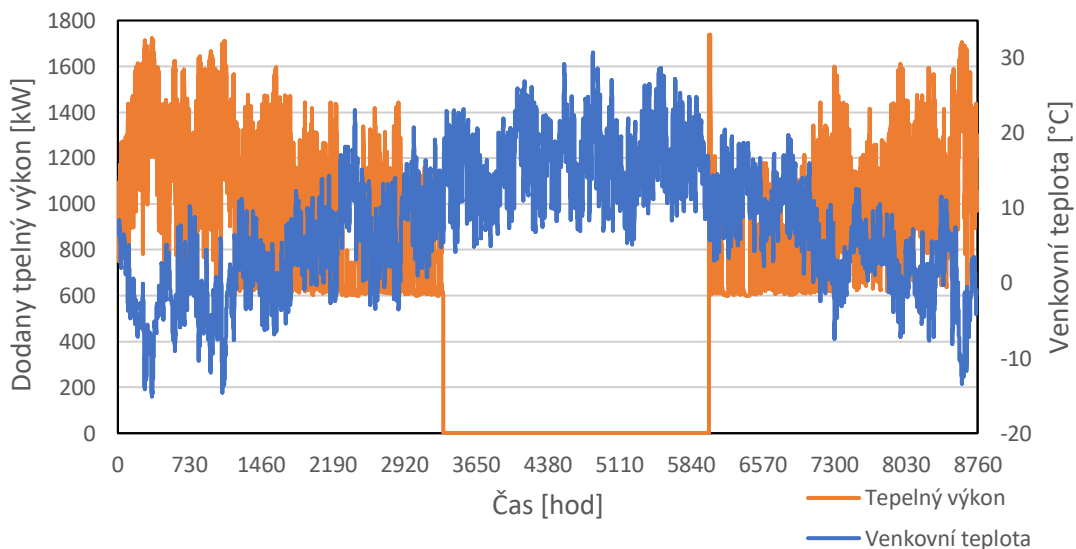
6. Výsledky a vyhodnocení

V této kapitole jsou uvedeny simulační výstupy a vyhodnocení jednotlivých scénářů. Pro všechny scénáře se vyhodnocuje roční simulace dodávky tepla na vytápění se zvoleným simulačním časovým krokem 0,5 h. Výstupy simulací jsou uloženy v příslušných textových souborech (příloha PE2) a zpracovány ve výpočetním excelu (příloha PE1) Nutno zmínit, že práce je orientována pouze na bilanci tepla. Elektrická energie vyjma provozu tepelného čerpadla a elektrokotle není do energetické bilance zahrnuta. V závěru této kapitoly jsou jednotlivé scénáře porovnány mezi sebou.

6.1 Konvenční CZT (1.scénář)

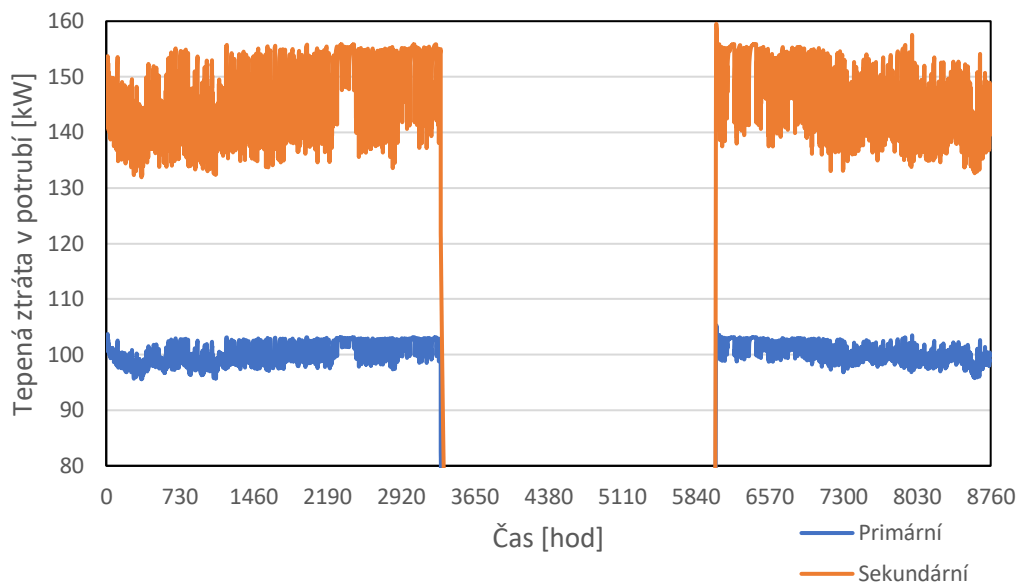
1. scénář reprezentuje SCZT studovaného případu. Výtopna s kotlem **spalující hnědé uhlí** o jmenovitém tepelném výkonu **1739 kW** zásobuje teplem devět bytových domů s potřebným tepelným výkonem na vytápění **1513 kW**. Zdroj tepla zahřívá otopnou vodu na teplotu 90 °C po celé období vytápění. Systém je regulován na teplotu 65 °C vratné otopné vody do zdroje tepla.

Na Grafu 18 je zobrazen průběh dodaného tepelného výkonu zdrojem tepla do SCZT během roku společně s aktuální venkovní teplotou. Z grafu je zřejmé, že se tepelný výkon v průběhu roku mění. Podle potřeby zdroj tepla svůj tepelný výkon moduluje na základě teploty přívodní otopné vody a žádané teploty na výstupu. Maximální tepelný výkon předaný do SCZT odpovídá nejnižším venkovním teplotám a době náběhu zdroje tepla při startu po letní odstavce. Celkové teplo přivedené v palivu činí **7425 MWh**. S účinností zdroje tepla 78 % je množství vyprodukovaného tepla do SCZT **5792 MWh**. S uvažovanou výhřevností hnědého uhlí **17,18 MJ/kg** vychází celková spotřeba **1555 t** za rok.



Graf 18 Průběh tepelného výkonu kotle na hnědé uhlí

Na Grafu 19 je zobrazen průběh tepelných ztrát v potrubí v primárním a sekundárním okruhu CZT. Tepelné ztráty se v průběhu otopné sezóny příliš nemění. Nemění se z důvodu téměř konstantně udržovaných teplot otopné vody v obou okruzích. V primárním okruhu dohromady za dobu provozu vychází tepelné ztráty v přívodním a vratném potrubí **604 MWh** a v sekundárním okruhu **835 MWh**. V sekundárním okruhu, kde je teplotní spád (72/60 °C) nižší, než v primárním okruhu vychází tepelné ztráty vyšší díky téměř dvojnásobnému průtoku otopné vody.

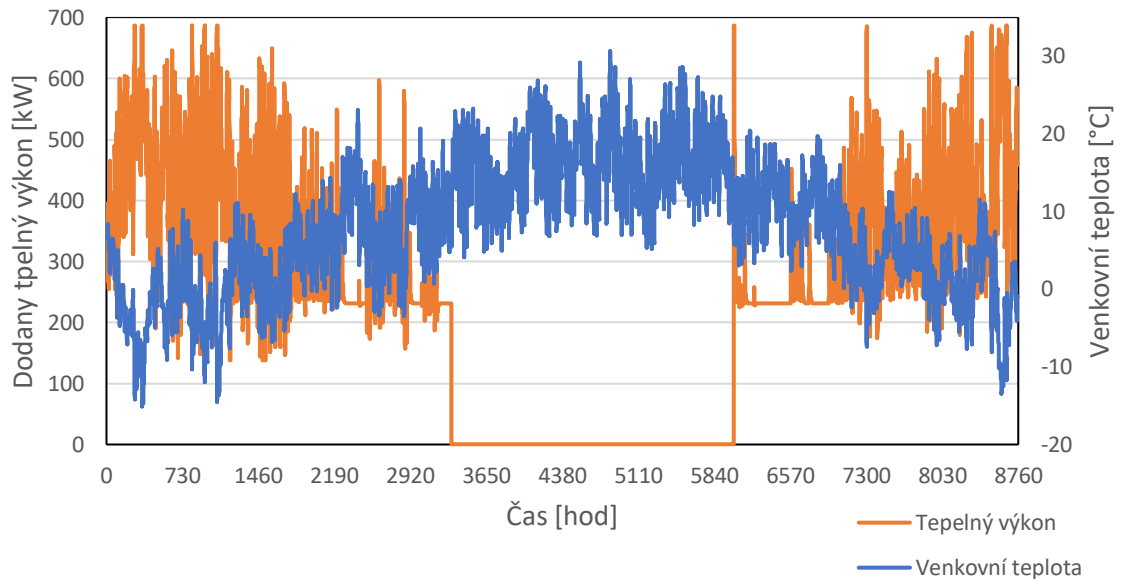


Graf 19 Průběh tepelných ztrát v primárním a sekundárním okruhu 1. scénáře

6.2 CZT s progresivním úsporným opatřením (2. scénář)

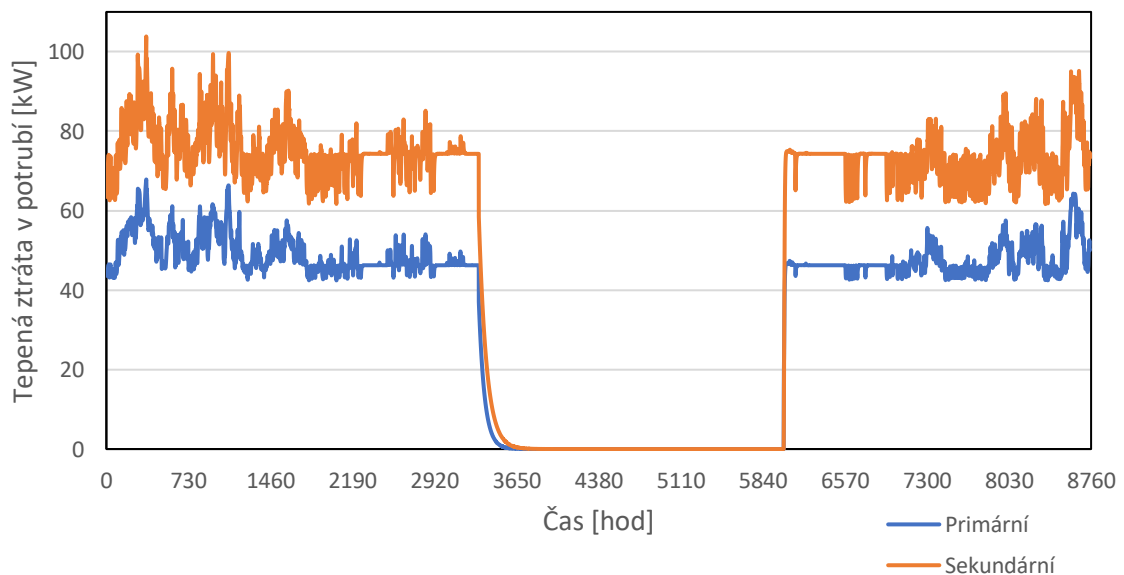
Ve 2. scénáři jsou bytové domy zatepleny tepelnou izolací a stará okna jsou nahrazena moderními izolačními okny. Po tomto úsporném opatření vychází potřebný tepelný výkon na vytápění všech bytových domů **512 kW**. Výtopna s kotlem na zemní plyn má jmenovitý výkon **687 kW**. Zdroj tepla ohřívá otopnou vodu v primárním okruhu na základě ekvitermní křivky pro teplotní spád 65/45 °C.

Na Grafu 20 je zobrazen průběh dodaného tepelného výkonu zdrojem tepla do SCZT. Zdroj tepla moduluje svůj tepelný výkon na základě aktuální žádané teploty otopné vody na výstupu podle ekvitermní křivky. Oblasti konstantního dodaného tepelného výkonu odpovídají minimální nastavené žádané teplotě na výstupu ze zdroje, tj. 45 °C. Celkové dodané teplo v palivu se rovná **2112 MWh**. Kotel na zemní plyn pracuje s účinností 98 %. Vyprodukované teplo pak vychází **2069 MWh**. Spotřeba zemního plynu s uvažovanou výhřevností **33,48 MJ/m³** je **227 067 m³** za rok.



Graf 20 Průběh tepelného výkonu kotle na zemní plyn

V Grafu 21 je znázorněn průběh tepelných ztrát v rozvodech. Je zřejmé, že se tepelné ztráty v průběhu období vytápění významně mění. V tomto případě totiž teplota otopné vody není řízena na konstantní hodnotu. Největší tepelné ztráty v rozvodech vychází pro extrémně nízké teploty okolí, kdy je naopak teplota otopné vody v systému nejvyšší. Znovu jsou tepelné ztráty rozvodů v sekundárním okruhu z důvodu většího průtoku vyšší než v primárním okruhu. V primárním okruhu jsou tepelné ztráty **291 MWh** a v sekundárním okruhu **446 MWh**.



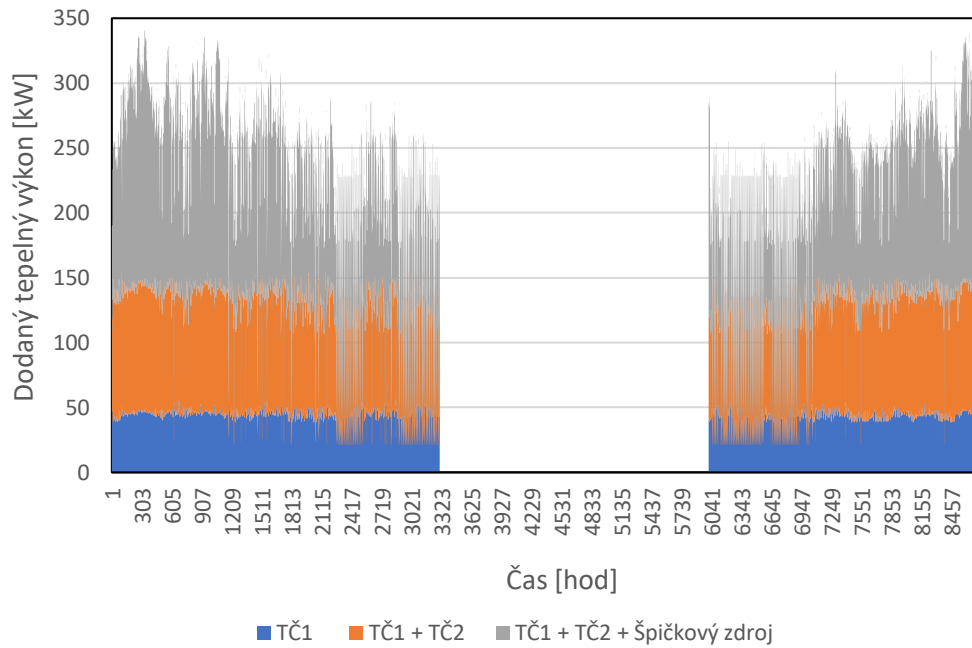
Graf 21 Průběh tepelných ztrát v rozvodech primárního a sekundárního okruhu CZT 2. scénáře

6.3 Částečně/plně elektrifikované CZT s progresivním úsporným opatřením (3. a 4. scénář)

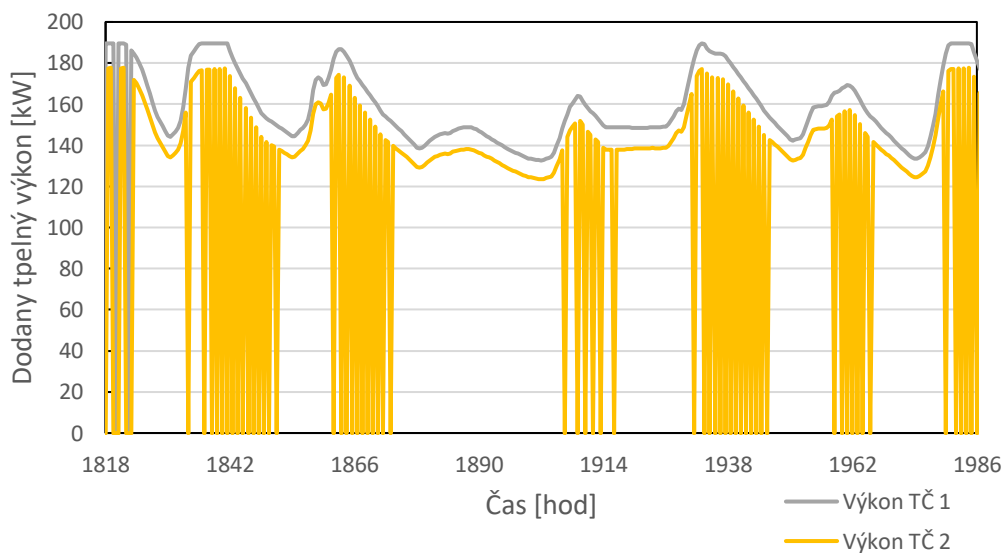
Ve 3. scénáři jsou v bytových domech provedena stejná úsporná opatření (zateplení a výměna oken). Navíc oproti předchozímu scénáři dochází ke změně typu centrálního zdroje tepla. SCZT je zásobována teplem sérií dvou tepelných čerpadel (vzduch – voda) o celkovém jmenovitém výkonu **280 kW** při jmenovitých podmínkách A2/W35 °C. Jako špičkový zdroj tepla v systému slouží kotel na zemní plyn o jmenovitém výkonu **407 kW**. Teplota přívodní otopné vody v primárním okruhu je znovu určena dle ekvitemní křivky pro teplotní spád 65/45 °C.

Graf 22 zobrazuje průběh celkového tepelného výkonu (všech zdrojů tepla) a tepelný výkon tepelných čerpadel. Vzhledem k objemu dat a měřítku grafů není bohužel zřetelné, že jsou tepelná čerpadla podle potřeby vypnutá nebo zapnutá. Pro názornou ukázkou jsou na Grafu 23 zobrazena týdenní data z března. První TČ je v provozu (bez častého vypínání) po výrazně delší dobu než druhé TČ. Zejména v přechodových měsících, kdy venkovní teplota značně kolísá, dochází k častému spínání obou TČ. Vyprodukované teplo u prvního TČ je **894 MWh** a u druhého TČ **648 MWh**. Celková spotřeba elektrické energie obou tepelných čerpadel činí **500 MWh**.

Špičkový zdroj tepla moduluje svůj tepelný výkon během zimních měsíců převážně spojitě, kdežto v přechodovém období pracuje v režimu ON/OFF nebo není vůbec v provozu. Celkové teplo dodané v palivu špičkovým zdroje je **539 MWh**. S účinností kotle 98 % činí vyprodukované teplo **528 MWh**. Celkem bylo spotřebováno **57 994 m³** zemního plynu.

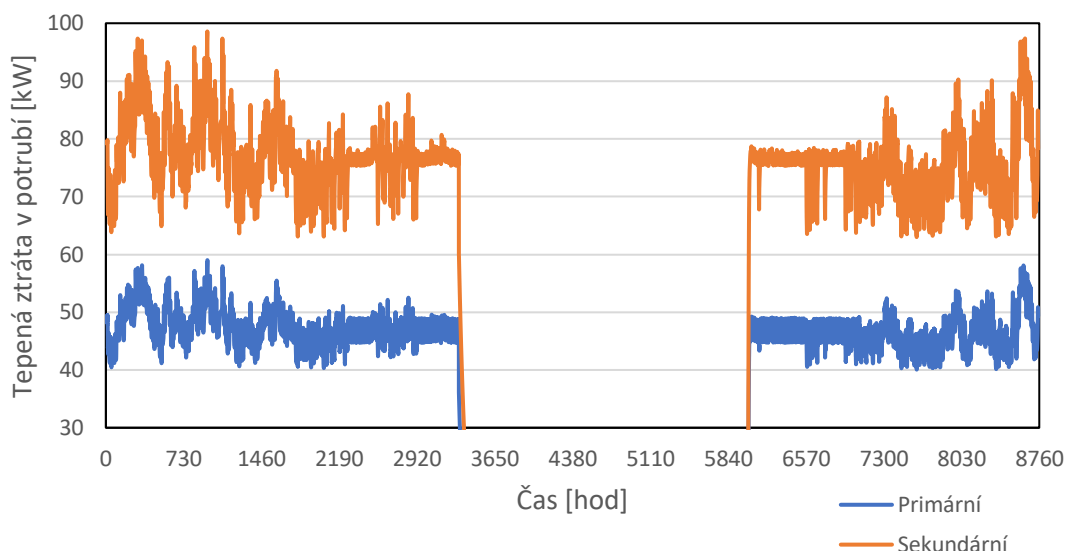


Graf 22 Průběh tepelného výkonu



Graf 23 Ukázka provozu tepelných čerpadel – týden v březnu

Tepelné ztráty v rozvodech jsou zobrazeny na Grafu 24. Výkonové a teplotní parametry systému jsou totožné s předchozím scénářem, proto je průběh i velikost tepelných ztrát podobný 2. scénáři. Příčinou malých rozdílů jsou teplotní odchylky otopné vody v potrubí během období vytápění. V primárním okruhu tvoří tepelné ztráty celkem **282 MWh** a v sekundárním okruhu **458 MWh**.



Graf 24 Průběh tepelných ztrát v primárním a sekundárním okruhu CZT 3. scénáře

Výstupy ze simulace 4. scénáře jsou shodné s výstupy simulace 3. scénáře pouze s rozdílem v množství celkového vyprodukovaného tepla špičkovým zdrojem, kterým je v tomto případě elektrokotel. S uvažovanou účinností zdroje 100 % se celková spotřebovaná elektrická energie **528 MWh** rovná vyprodukovanému teple **528 MWh**.

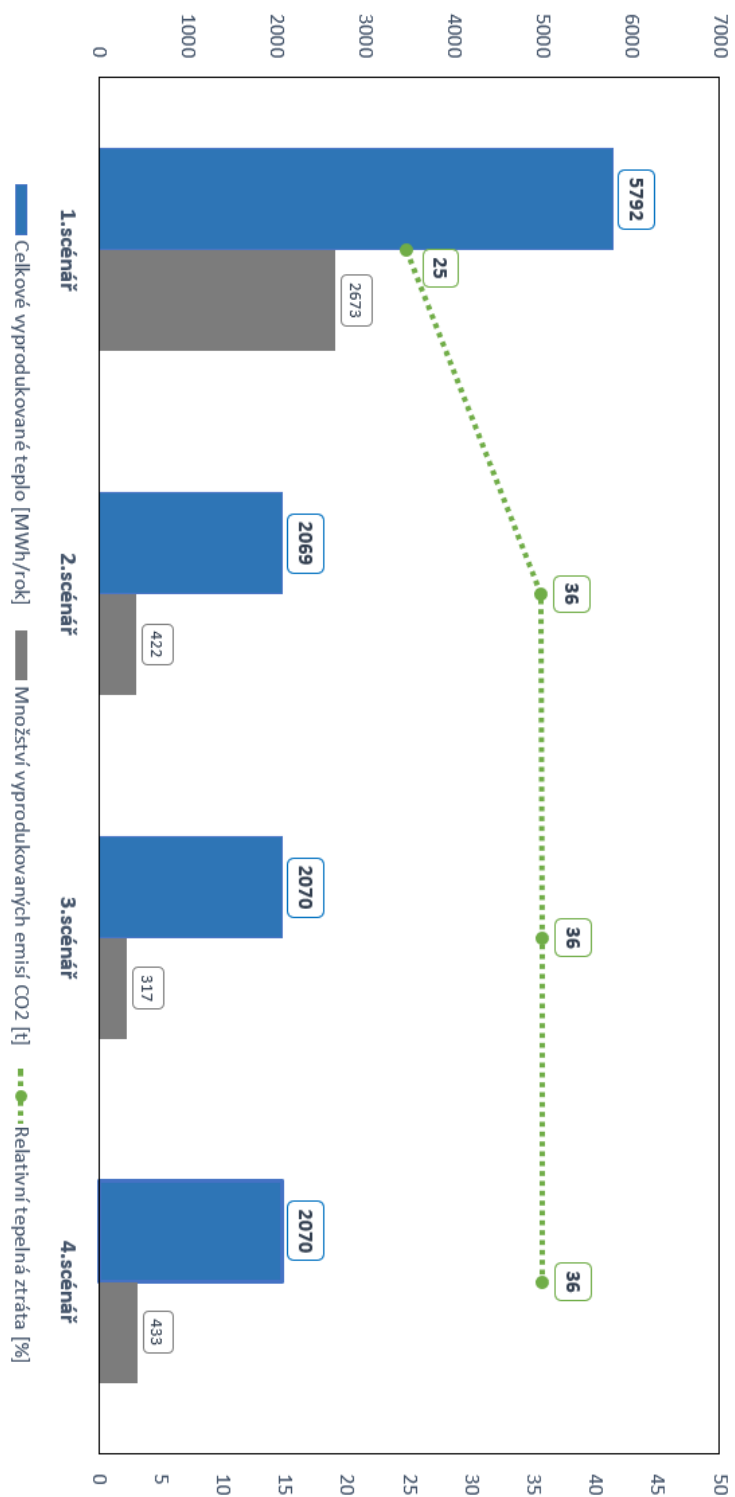
6.4 Celkové vyhodnocení

V této kapitole je uveden souhrnný přehled dílčích výsledků pro každý scénář a jsou vyhodnoceny zvolené klíčové indikátory z kapitoly 3.4.

Tab. 15 Tabulka výsledků

	1.scénář	2.scénář	3.scénář	4.scénář	
Celkové vyprodukované teplo	5792	2069	2070	2070	MWh/rok
Celkové dodané teplo do spotřeb. okruhů	4300	1330	1330	1330	MWh/rok
Celkové tepelné ztráty	1439	737	740	740	MWh/rok
Relativní tepelná ztráta	25	36	36	36	MWh/rok
Roční měrná spotřeba tepla na vytápění	149	46	46	46	kWh/m ² rok
Množství vyprodukovaných emisí CO ₂	2673	422	317	433	tCO ₂ ekv./rok

Po zahrnutí tepelných ztrát v rozvodech a účinnosti zdroje tepla a výměníku předávacích stanic tvoří dodané teplo do spotřebitelských okruhů v konvenčním CZT **4300 MWh**. V systémech CZT s progresivním opatřením (scénář 2 až 4) je dodané teplo méně než třetinové. Z vyhodnocení roční měrné potřeby tepla na vytápění bytového domu s celkovou podlahovou plochou 3200 m² před rekonstrukcí v konvenční SCZT a po rekonstrukci v SCZT s progresivním opatřením je zřejmé, že úsporným opatřením na straně budovy je ušetřeno více než **100 kWh/m²rok**.



Graf 25 Celkové vyhodnocení návrhových scénářů

Graf 25 zobrazuje srovnání všech návrhových scénářů systému CZT z hlediska celkového množství vyprodukovaného tepla, relativních tepelných ztrát v rozvodech a množství emisí CO₂ ekv.

Konvenční systém CZT v 1. scénáři, který je provozován za vysokých teplot a regulován na konstantní teplotu otopné vody ve vratném potrubí vykazuje celkové tepelné ztráty v rozvodech **1439 MWh/rok**. Z celkové produkce tepla centrálním zdrojem tak tvoří tepelné ztráty **25 %**. V ostatních scénářích (2, 3 a 4) systému CZT, kde jsou provozní teploty významně nižší a tepelný výkon zdroje je řízen na základě ekvitermní křivky, tvoří tepelné ztráty v rozvodech **737 MWh/rok** čemuž odpovídá v porovnání s celkovým dodaným teplem relativní tepelná ztráta **36 %**.

Zdroj tepla konvenčního systému CZT vyprodukoval celkem **5792 MWh/rok**. Množství vyprodukovaného tepla se ve scénářích (2 až 4), kde byl systém daným způsobem modernizován, značně liší. V každém z nich zdroj/e vyprodukoval/y téměř **2070 MWh/rok**. V porovnání s konvenčním CZT vychází, že bylo celkem ušetřeno v každém scénáři **3422 MWh/rok**.

Graf 25 dále ukazuje množství vyprodukovaných emisí CO₂ ekv. v systémech CZT jednotlivých scénářů. Z grafu je zřejmé, že množství emisí CO₂ ekv. vyprodukovaných v konvenčním systému CZT je mnohonásobně vyšší než v ostatních scénářích. Na základě množství dodaného tepla, účinnosti zdroje tepla a emisního faktoru pro hnědé uhlí (**0,36**) vychází, že celkové množství vyprodukovaných emisí CO₂ ekv. za období vytápění je **2673 t**.

Ve 2. scénáři kde, se nahradilo hnědé uhlí zemním plynem (s emisním faktorem **0,2**), bylo vyprodukováno **422 t** emisí CO₂ ekv. Oproti 1. scénáři tak došlo k úspoře emisí CO₂ ekv o **2251 t**.

Ve 3. scénáři, kde do soustavy CZT byla instalována dvě tepelná čerpadla (vzduch – voda) a stávající kotel na zemní plyn už sloužil pouze jako špičkový zdroj tepla vychází následující. Špičkový zdroj tepla za dobu svého provozu vyprodukoval celkem **108 t** emisí CO₂. Tepelná čerpadla, u kterých se jejich aktuální spotřeba elektrické energie násobí příslušnou intenzitou CO₂ na kterou má vliv energetický mix výroby el. energie v konkrétním čase vychází, že dohromady provoz tepelných čerpadel odpovídá **209 t** vyprodukovaných emisí CO₂ ekv. Dohromady tak celkové emise

CO₂ ekv. činí **317 t**. Oproti konvenčnímu systému CZT se ušetřilo **2356 t** emisí CO₂ ekv.

Ve 4. scénáři (s tepelnými čerpadly a elektrokotlem), který představuje plně elektrifikovanou SCZT vychází množství emisí CO₂ ekv. pro elektrokotel **224 t** pro tepelná čerpadla **209 t**. Celkové emise CO₂ ekv. jsou tak **433 t** a oproti konvenčnímu systému CZT bylo dosaženo úspory **2135 t**.

Celkově tak bylo největší úspory emisí CO₂ ekv. oproti studovanému případu konvenčního CZT (1. scénář) dosaženo ve 3. scénáři (**2356 t**), dále pak ve 2.scenáři (**2251 t**) a naposled ve 4. scénáři (**2135 t**).

7. Diskuse

Navržené scénáře reprezentují postupné kroky vedoucí k modernizaci CZT a pomocí simulačních metod analyzují dopad opatření, která jsou indikována klíčovými ukazateli. Dále budou diskutovány jednotlivé zásahy do systému CZT a jejich vliv na energetickou náročnost a ekologičnost provozu.

Původní nezrekonstruované bytové domy v konvenčním CZT (scénář 1) vykazují vysoké tepelné ztráty (**168 kW**) a jsou značně energeticky náročné. Jejich roční měrná potřeba tepla na vytápění (**149 kWh/m²rok**) je v porovnání s dnešními energetickými standardy budov příliš vysoká. To je z hlediska budování nízkoenergetických a nízkoemisních systémů CZT nepřijatelné. V ostatních scénářích (2, 3 a 4) jsou proto bytové domy zrekonstruovány. Zateplením obálky budov a výměnou oken za moderní izolační se dle simulace dosáhne snížení tepelné ztráty na **57 kW** a roční měrné spotřeby tepla na vytápění **46 kWh/m²rok**. Takové hodnoty lze považovat za velmi příznivé. Budovy s takovou spotřebou energie na vytápění se řadí do standardu nízkoenergetických budov. Stále je zde však prostor pro další snižování energetické náročnosti. Dlouhodobým cílem je dosáhnout energetického standardu pasivních nebo nulových budov.

Snížení energetické náročnosti budov je základním předpokladem pro snížení provozních teplot teplonosné látky. Současné provozní teploty konvenčních systémů CZT jsou stále příliš vysoké (>90 °C). Provozní teploty se musí snížit a minimalizovat tak tepelné ztráty, které v rozvodech tvoří nezanedbatelnou část z dodaného tepla soustavou CZT. Soustava studovaného případu CZT je navržena na provozní teploty **90/65 °C** s regulací na minimální teplotu vratné otopné vody do zdroje kvůli

nízkoteplotní korozi. Takto navržený systém nepracuje s vysokou účinností a způsobuje značné tepelné ztráty, které tvoří **25 %** z dodaného tepla do SCZT. Snížením teplotního spádu na **65/45 °C** a regulací tepelného výkonu na základě ekvitemní křivky byly tepelné ztráty v rozvodech sníženy téměř na polovinu. Lze konstatovat, že nižší provozní teploty otopné vody a efektivnější způsob regulace tepelného výkonu mají za následek významné snížení tepelných ztrát v rozvodech. Takovou úsporu lze považovat za velmi uspokojivý výsledek. Nicméně protože se ve všech návrhových scénářích uvažuje původní rozvodná síť (rozměry potrubí a tepelná izolace), tepelné ztráty je možné ještě modernizací potrubního systému významně zredukovat. Relativní tepelné ztráty vzrostly z **25 %** na **36 %**. Z nárůstu relativní tepelné ztráty vyplývá, že v systémech s progresivním úsporným opatřením, kde se snížila potřeba tepla celého systému vlivem rekonstrukce bytových domů a na základě toho kleslo i množství dodaného tepla, se však zvýšil procentuální podíl tepelných ztrát rozvodů na dodaném teple do SCZT. Tepelné ztráty tak v moderních nízkoteplotních systémech CZT nabývají na důležitosti a je nutné věnovat jim patřičnou pozornost. Nižší provozní teploty mimo jiné umožňují v systému efektivně využívat nízkopotenciální zdroje energie jako je odpadní teplo, energie ze Slunce nebo okolí apod.

Zásadní vliv mají výše zmíněná opatření (na straně budov, zdrojů tepla i tepelných sítí) na celkové požadované množství tepla na vytápění dodané soustavou CZT. Při zachování tepelné pohody odběratelů se množství celkového vyprodukovaného tepla ve scénářích 2, 3 a 4 oproti scénáři 1 snížilo o **64 %**.

Produkce tepla je přímo spojena s množstvím vyprodukovaných emisí CO₂ekv. Nejvíce bylo vyprodukováno v konvenčním systému CZT (**2673 t CO₂ ekv.**), kde zdroj tepla spaluje hnědé uhlí. Ve druhém scénáři, kde je hnědé uhlí nahrazeno zemním plynem a kleslo množství vyprodukovaných emisí CO₂ekv. na **422 t**. Přejít z uhlí na zemní plyn tak značně přispěl k dekarbonizaci konvenčního systému CZT, a to snížením emisí CO₂ ekv. o **84 %**. Toto řešení se jeví jako velmi příznivé, ale mělo by jít pouze o dočasnou alternativu náhrady uhlí jiným fosilním palivem. Zemní plyn, stejně jako uhlí, vykazuje při zpracování značné emise, proto je potřeba přejít na nízkoemisivní zdroje energie a zemní plyn využívat jako druhotné palivo pro špičkové zdroje tepla. V rámci dekarbonizace energetického sektoru se očekává rozsáhlá elektrifikace, ve které sehrají důležitou roli tepelná čerpadla. Ve třetím scénáři, kde je soustava CZT částečně elektrifikována použitím tepelných čerpadel (vzduch – voda) s kotlem na zemní plyn sloužící jako špičkový zdroj tepla, pak bylo dosaženo dalšího

snížení emisí a to **na 105 t CO₂ ekv.** za rok. Ve výsledku jde o **25%** snížení ve srovnání s předchozím případem, kdy uhlí bylo nahrazeno zemním plynem. Ve 4. scénáři (s tepelnými čerpadly a elektrokotlem), který představuje plně elektrifikovanou SCZT došlo naopak ve srovnání se scénářem 3 k nárůstu vyprodukovaných emisí o **116 t CO₂ ekv.** (zvýšení o **36 %**). Příčina nárůstu emisí je přisuzována energetickému mixu výroby elektrické energie (profil intenzity CO₂), která je v ČR založena převážně na využívání fosilních paliv. Aktuálně v českých podmínkách tak vychází, že úplná elektrifikace systému CZT není nejlepší řešením pro maximální snížení produkce emisí CO₂ ekv. Zvýšení ekologičnosti provozu plně elektrifikované soustavy CZT oproti částečně elektrifikované by se dalo očekávat v případě zvýšené produkce elektrické energie z OZE.

Jako nejlepší varianta tedy vychází systém CZT s tepelnými čerpadly (vzduch – voda) a kotlem na zemní plyn, pokrývající odběrové špičky, kdy se povedlo snížit emise o **88 %** ve srovnání s konvenčním systémem CZT. Ekologičnost provozu systému CZT by mohla být ještě více ovlivněna, kdyby se například uvažovala tepelná čerpadla (voda – voda) využívající odpadní teplo z průmyslu nebo datových center.

8. Závěr

Práce se věnovala zpracování simulační analýzy úsporných a modernizačních opatření a jejich vlivu na energetickou a enviromentální náročnost příkladového systému CZT. Nejprve byl zkoumán současný stav CZT v ČR a byly zmapovány současné trendy modernizace ze zahraničí a možné scénáře vývoje. Dále bylo zadáním vytvořit energetický model příkladového systému CZT a provést simulační analýzu pro modernizační scénáře.

Z rešerše vyplývá, že v ČR je vybudovaná rozsáhlá síť systémů CZT zásobující teplem anebo teplou užitkovou vodou celkem 40 % domácností. Významná část z nich již nesplňuje současné nároky na ekologičnost provozu. Tuzemské teplárství a jeho výroba tepelné energie je více než z poloviny založena na využívání fosilních paliv, zejména uhlí. Vysoký podíl fosilních paliv na výrobě energie je do budoucna neudržitelný a lze očekávat pokračující přechod z uhlí na zemní plyn, biomasu a případně studovanou elektrifikaci CZT systémů.

Teoretické poznatky byly využity k návrhu modernizačních scénářů: a) konvenční systém CZT, b) CZT s progresivním úsporným opatřením, c) částečně elektrifikované CZT s progresivním úsporným opatřením a d) plně elektrifikované CZT s progresivním úsporným opatřením. Jednotlivé scénáře byly testovány na vyvinutém simulačním modelu příkladového CZT. Numerický model byl vyvinut v simulačním prostředí TRNSYS, kde byly sestaveny dílčí numerické modely reprezentující navrhované modernizační scénáře. Kvalita sestavených modelů byla ověřena výpočty dle normy ČSN EN 12 831 a v případě modelu TČ srovnána s katalogovými daty od výrobce. Výstupy simulací jednotlivých modernizačních scénářů byly vyhodnoceny pro identické okrajové podmínky a porovnány mezi sebou pomocí zvolených klíčových indikátorů a) energetická náročnost a b) enviromentální dopady.

Z provedené simulační analýzy vyplývají následující poznatky. Rekonstrukcí bytových domů (zateplení obálky budovy a výměna oken) se snížila měrná potřeba tepla na vytápění na třetinu. Snížením provozních teplot a zavedením plynulého řízení tepelného výkonu zdroje na základě ekvitermní křivky tepelné ztráty v rozvodech poklesly téměř o 50 %. Celková úspora energie při zavedení výše zmíněných opatření na straně spotřeby včetně tepelné sítě činí 65 % oproti referenčnímu případu (konvenční CZT).

Dalším aspektem bylo posouzení ekologičnosti provozu ve smyslu ekvivalentu uhlíkových emisí. Úspornými opatřeními a náhradou uhlí zemním plynem bylo dosaženo úspory emisí CO₂ekv. o 84 % v porovnání s referenčním případem. Částečnou elektrifikací systému CZT tepelnými čerpadly (vzduch – voda) s pokrytím špičkového výkonu kotlem na zemní plyn se emise snížily ještě o 25 %. Naopak v plně elektrifikovaném systému CZT s tepelnými čerpadly a elektrokotlem se emise zvýšily o 36 % oproti systému s částečnou elektrifikací. V současné situaci elektrická síť v ČR nenabízí dostatečně čistou energii a úplná elektrifikace CZT, pokud se uvažují tepelná čerpadla (vzduch – voda), nevede ke zlepšení ekologičnosti provozu.

Nicméně elektrifikace systému CZT má potenciál pro poskytování služeb výkonové rovnováhy, která bude stěžejní pro vyšší integraci intermitentních OZE do elektrické sítě. V konečném důsledku tak elektrifikace přispívá k dekarbonizaci elektrických soustav. K poskytování těchto služeb se také váže i možnost sezónního ukládání energie, kde mohou systémy CZT hrát důležitou roli. Možné úložiště, kterými mohou tyto systémy disponovat byly popsány v teoretické části práce. Studium energetické náročnosti CZT se sezónním úložištěm se ukázalo být nad rámec této diplomové práce a analýza tohoto scénáře nebyla prakticky zpracována. Avšak vytvořený simulační model je možné dále rozšiřovat a s jeho pomocí studovat další aspekty související s elektrifikací CZT např. vliv akumulčních zásobníků tepla na provoz systémů CZT.

Použitá literatura

- [1] „Fit for 55“: plnění klimatického cíle EU pro rok 2030 na cestě ke klimatické neutralitě [online]. 14.7.2021 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_cs
- [2] O strategii EU pro vytápění a chlazení [online]. 2016 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2016-0232_CS.html#title1
- [3] Analýza teplárenství [online]. [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://cdn0.erstegroup.com>
- [4] Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR. Zpráva o vývoji energetiky v oblasti tepla za rok 2019 [online]. 2019 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/2021/7/Zprava-o-vyvoji-energetiky-v-oblasti-tepla-za-rok-2019_1.pdf
- [5] Energetický regulační úřad. ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU TEPLÁRENSKÝCH SOUSTAV ČESKÉ REPUBLIKY ZA ROK 2020 [online]. 2020 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/2021/7/Zprava-o-vyvoji-energetiky-v-oblasti-tepla-za-rok-2019_1.pdf
- [6] Cesta ke klimaticky neutrálnímu hospodářství: Strategie EU pro integraci energetického systému [online]. 8.7.2020 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0299&from=CS>
- [7] WINKLER, Jaroslav. Odpojování bytových domů od otopných soustav [online]. 9.1.2018 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <http://ekn.cz/odpojovani-bytovych-domu-od-otopnych-soustav/>
- [8] HODOBOŇ, Josef. Záchrana soustav centrálního zásobování teplem přechodem na zemní plyn [online]. 2.7.2020 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-plynem/20881-zachrana-soustav-centralniho-zasobovani-teplem-prechodem-na-zemni-plyn>
- [9] ZILVAR, Jiří. Syntetická paliva – power to gas, power to liquid: výroba a účinnost [online]. 2.7.2020 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://oze.tzb->

info.cz/akumulace-elektřiny/20711-synteticka-paliva-power-to-gas-power-to-liquid-vyroba-a-ucinnost

- [10] Ministerstvo životního prostředí. Politika ochrany klimatu v ČR [online]. 26.5.2020 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/politika_ochrany_klimatu_2017/\\$FILE/OEOK_POKMS_20180105.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/politika_ochrany_klimatu_2017/$FILE/OEOK_POKMS_20180105.pdf)
- [11] LUPÍŠEK, Antonín. Úspory energie v českých budovách a emise skleníkových plynů [online]. 8.7.2019 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/budovy-s-temer-nulovou-spotrebou-energie/19287-uspory-energie-v-ceskych-budovach-a-emise-sklenikovych-plynu>
- [12] Buildings Performance Institute. EUROPE'S BUILDINGS UNDER THE MICROSCOPE [online]. 2011 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR_EU_B_under_microscope_study.pdf
- [13] Heat Roadmap Europe. Technology Data and Demand Modelling [online]. 2020 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2018/11/HRE4_D3.2.pdf
- [14] JADWISZCZAK, Piotr et al. Heat pump placement, connection and operational modes in European district heating [online]. 2018 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/323170791_Heat_pump_placement_connection_and_operational_modes_in_European_district_heating
- [15] Ministerstvo průmyslu a obchodu. Dlouhodobá strategie renovací [online]. 2010 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/energeticka-ucinnost/strategicke-dokumenty/2020/6/_20_III_dlouhodobá_strategie_renovaci_20200520_schvalene.pdf
- [16] TYWONIAK, Jan a kolektiv. Pozemní stavitelství VI pro SPŠ stavební. Grada, 2014. ISBN 978-80-247-5102-3.
- [17] STÚ-K, a.s. Příručka typologií obytných budov [online]. 2011 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://episcopo.eu/fileadmin/tabula/public/docs/brochure_until2012/CZ_TABULA_TypologyBrochure_STU-K_2011.pdf



- [18] HRDLIČKA, Tomáš. Specifika oceňování pasivních rodinných domů nákladovou metodou. Vysoké učení technické v Brně. Ústav soudního inženýrství, 2016.
- [19] BURIAN, Pavel. Úpravy otopných systémů po zateplení domů ENBRA je specialista na regulaci otopných systémů [online]. 5.6.2012 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/mereni-a-regulace/8666-upravy-otopnych-systemu-po-zatepleni-domu>
- [20] LUND, Henrik et al. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems [online]. 15.4.2014, , 11 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214002369?via%3Dihub>
- [21] GUDMUNDSSON, Oddgeir. Distribution of district heating: 3rd Generation [online]. 9.12.2016 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://www.linkedin.com/pulse/distribution-district-heating-3rd-generation-oddgeir-gudmundsson/?trk=pulse_spock-articles
- [22] LUND, Henrik et al. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems [online]. 15.4.2014 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214002369?via%3Dihub>
- [23] MATUŠKA, Tomáš.: Zásobování teplem – hydraulické výpočty tepelných sítí (přednáška) Praha: ČVUT, říjen až prosince 2020
- [24] BERTELSEN, Nis et al. Integrating low-temperature renewables in district energy systems [online]. 2021 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://vbn.aau.dk/files/406326231/Integrating_low_temperature_renewables_in_district_energy_systems_Guidelines_for_policymakers_2021.pdf
- [25] LI, Hongwei et al. Challenges in Smart Low-temperature District Heating Development [online]. 2016 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/270823481_Challenges_in_Smart_Low-temperature_District_Heating_Development

- [26] RUTZ, Dominik et al. Upgrading the performance of district heating networks. Mnichov, 2019. ISBN 978-3-936338-49-2.
- [27] BAŠTA, Jiří. Volba teplotního spádu [online]. 13.4.2001 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/525-volba-teplotniho-spadu>
- [28] LIDBERG, Tina et al. Impact of Domestic Hot Water Systems on District Heating Temperatures [online]. 19.11.2019 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1461725/FULLTEXT01.pdf>
- [29] VRÁNA, Jakub. Rozvody teplé vody – I [online]. 13.7.2009 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/priprava-teple-vody/5775-rozvody-teple-vody>
- [30] Bakterie legionella [online]. [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: Legionella .cz
- [31] BRAND, Marek. Heating and Domestic Hot Water Systems in Buildings Supplied by Low-Temperature District Heating [online]. 2014 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://orbit.dtu.dk/files/103682872/Marek_Brand_Afhandling..PDF
- [32] BRADÁČOVÁ, Anna. Legislativní požadavky v oblasti přípravy teplé vody [online]. 24.10.2016 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://voda.tzb-info.cz/priprava-teple-vody/14837-legislativni-pozadavky-v-oblasti-pripravy-teple-vody?fbclid=IwAR1bI93myUxKLq9ECmO0xEJCvQYO_zpEPxxJS-RdrSAiPI4NhwTX8-8HF5
- [33] LI, Hongwei et al. Evaluations of different domestic hot water preparing methods with ultra-low-temperature district heating [online]. 10.6.2016 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216305291>
- [34] ZELENÝ, Karel. STUDIE PROBLEMATIKY SNIŽOVÁNÍ ENERGETICKÝCH ZTRÁT A ZVÝŠENÍ SPOLEHLIVOSTI PŘI DODÁVKÁCH TEPLA [online]. 2007 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Studie_problematiky_snizovani_energetickyh_ztrat_a_zvyseni_spolehlivosti__pri_dodavkach_tepla_2220047215.pdf

- [35] BUDÍN, Jan. Infografika: Elektrifikace jako prostředek dekarbonizace [online]. 13.7.2017 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/infografika-elektrifikace-jako-prostredek-dekarbonizace>
- [36] ELECTRIFICATION WITH RENEWABLES [online]. [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jan/IRENA_RE-Electrification_SGCC_2019_preview.pdf
- [37] EUROPEAN CLIMATE FOUNDATION. Roadmap 2050: A practical guide to a prosperous low-carbon Europe [online]. 2010 [cit. 2021-18-12]. Dostupné z: <https://www.roadmap2050.eu>
- [38] VALENTOVÁ, Michaela a spol. KLIMATICKO-ENERGETICKÉ INVESTICE VTEPLÁRENSTVÍ [online]. 2021 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://ekonom.feld.cvut.cz/cs/katedra/lide/valenmi7/cic2030/reports/ipp-teplarenstvi-exec-summary-czech-final.pdf>
- [39] MATUŠKA, Tomáš a Bořivoj ŠOUREK. Tepelná čerpadla - teorie a schémata (I) [online]. 31.10.2005 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/2820-tepelna-cerpadla-teorie-a-schemata-i>
- [40] PANTANI, Stephen. Heating Electrification: The Next Opportunity for Coordinated Climate Action [online]. 14.4.2020 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://www.clasp.ngo/updates/heating-electrification-the-next-opportunity-for-coordinated-climate-action/>
- [41] LUND, Henrik et al. Heat Roadmap Europe: Large-Scale Electric Heat Pumps in District Heating Systems [online]. 18.4.2017 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/4/578/htm>
- [42] MATUŠKA, Tomáš. Parametry pro hodnocení efektivity tepelných čerpadel: COP a SCOP [online]. 14.9.2015 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/13196-parametry-pro-hodnoceni-efektivty-tepelnych-cerpadel-cop-a-scop>
- [43] Heat Roadmap Europe. Heat Roadmap Europe 4 [online]. 2020 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2019/02/HRE_Final-Brochure_web.pdf

- [44] EGÚ Brno. Centrální a decentrální výroba elektřiny a tepla [online]. 2017 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://www.ceskajadernaasociace.cz/wp-content/uploads/2021/05/Centralni-a-decentralni-vyroba-elektriny-a-tepla.pdf>
- [45] SØRENSEN, Alex. Best Practice for implementation and operation of large scale Borehole and Pit Heat Thermal Storages [online]. 2019 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://www.solar-district-heating.eu/wp-content/uploads/2019/10/Best-practice-Br%C3%A6dstrup-Marstal-Dronninglund-and-Gram-003.pdf>
- [46] SHC (Solar Heating and Cooling Programme). Seasonal thermal energy storage [online]. 29.6.2015 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: http://task45.iea-shc.org/data/sites/1/publications/IEA_SHC_Task45_B_Report.pdf
- [47] KNY, Martin a Miroslav URBAN. Vodní zásobníky pro dlouhodobou akumulaci tepla [online]. 16.6.2014 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-tepla/11358-vodni-zasobniky-pro-dlouhodobou-akumulaci-tepla>
- [48] ADAMS, Thomas A. Modeling and Simulation of Energy Systems. 2. CC BY-NC-ND licence, 2019. ISBN 978-3-03921-519-5.
- [49] Energy PLAN [online]. [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://www.energyplan.eu/>
- [50] TRNSYS [online]. [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <http://www.trnsys.com/>
- [51] HOMER Software [online]. [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>
- [52] System Advisor Model (SAM) [online]. [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://sam.nrel.gov/>
- [53] RETScreen [online]. [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>
- [54] THERMOS [online]. [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://www.thermos-project.eu/thermos-tool/what-is-thermos/>

- [55] OPENMODELICA [online]. [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://www.openmodelica.org/>
- [56] CORTÉS, Pau. Optimisation of District Heating & Cooling systems [online]. 28.2.2017 [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: http://www.opti2020.eu/wp-content/uploads/2019/07/D2.1-State-of-the-art_scenarios_requirements_and_KPI.pdf
- [57] HUDCOVÁ, Lenka a kolektiv. ENERGETICKÁ náročnost BUDOVOV. Praha, 2009. ISBN 978-80-87333-03-7.
- [58] MASATIN, Vladislav et al. Evaluation Factor for District Heating Network Heat Loss with Respect to Network Geometry [online]. 14.10.2015 [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216307081>
- [59] CI2 o.p.s. METODIKA STANOVENÍ UHLÍKOVÉ STOPY PODNIKU [online]. 2016 [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: https://ci2.co.cz/sites/default/files/souboryredakce/metodika_final_vystup.pdf
- [60] NOVOTNÝ, Jiří a Tomáš MATUŠKA. Emise CO₂ a jejich dopad na hodnocení zdrojů v budovách [online]. 19.3.2018 [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/provoz-a-udrzba-vytapani/17112-emise-co2-a-jejich-dopad-na-hodnoceni-zdroju-v-budovach>
- [61] JAKUBES, Jaroslav a Jiří SPITZ. ENVIRONMENTÁLNÍ VYHODNOCENÍ V RÁMCI ENERGETICKÝCH AUDITŮ [online]. 2002 [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/2182.pdf>
- [62] S. Klein, W. Beckman, J. Mitchell, J. Duffie, N. Duffie, T. Freeman, J. Mitchell, J. Braun, B. Evans, J. 511Kummer, et al, TRNSYS 17. ATRaNsient SYstem Simulation Program; Mathematical Reference, Solar 512Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison: Madison, WI, USA, 4 (2014).
- [63] LAZZARRIN, Renato M. The importance of the modulation ratio in the boilers installed in refurbished buildings [online]. 2014 [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814000905>
- [64] S. Klein, W. Beckman, J. Mitchell, J. Duffie, N. Duffie a T. Freeman, „TRNSYS 15 A transient system simulation and program,“ Madison:, 2000

- [65] ČSN 38 3350. Zásobování teplem, všeobecné zásady. 1988.
- [66] NUSSBAUMER, Thomas et al. Handbook on Planning of District Heating Networks. 2020. ISBN 3-908705-39-8.
- [67] DAY, Antony R. et al. Control of heating plants. 1., 2003. ISBN 9780470774458.
- [68] J. Bašta, Hydraulika a řízení otopných soustav, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN:80-01-02808-9
- [69] HODOBOŇ, Josef. Výpočet a graf ekvitermní křivky [online]. 8.3.2017 [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/mereni-a-regulace/15462-vypocet-a-graf-ekvitermni-krivky>
- [70] Priemyselné vysokoteplotné tepelné čerpadlo vzduch – voda v prevedení Split. WAMAK [online]. 2019 [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: https://www.wamak.eu/wapps/datasheets/v2019/datasheet.php?lang=sk-SK&user_company=WAMAK&PDF&GraphDS=0&ElSchemaDS=0&IntroDS=1&TechInfoDS=1&TableDataDS=1&DimensionsDS=1&SysSchemaDS=1&HydrSchemaDS=1&code=WAHD1145
- [71] MATUŠKA, Tomáš.: Zásobování teplem – Výpočet potřeby tepla na vytápění (přednáška) Praha: ČVUT, říjen až prosince 2020
- [72] MATUŠKA, Tomáš.: Zásobování teplem – Návrh tepelného výkonu na vytápění budov (přednáška) Praha: ČVUT, říjen až prosince 2020
- [73] ElectricityMap [online]. [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <https://app.electricitymap.org/map>

Přílohy

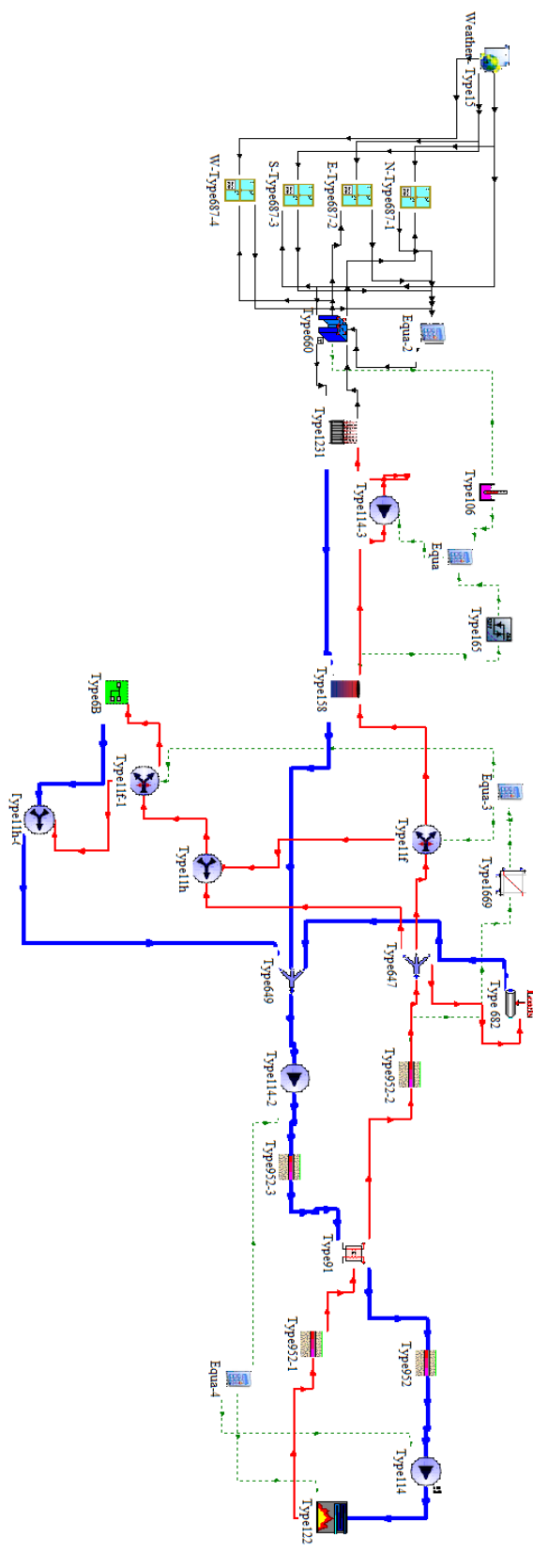
Seznam tištěných příloh

- | | |
|------|--|
| [P1] | Simulační schéma základního modelu |
| [P2] | Katalogové hodnoty tepelného čerpadla WAMAK AW 140 EVI |

Seznam příloh na CD

- | | | |
|-------|------------------|----------|
| [PE1] | Výpočtový excel | (.xlsx.) |
| [PE2] | Simulační modely | (.tpf) |
| [PE3] | Diplomová práce | (.pdf) |

[P1] - Simulační schéma základního modelu



[P2] - Katalogové hodnoty tepelného čerpadla WAMAK AW 140 EVI

zdroj	Tepelný výkon / výstupná teplota (kW)				El. príkon / výstupná teplota (kW)				COP / výstupná teplota (-)			
	35	45	55	65	35	45	55	65	35	45	55	65
20	217,48	218,12	219,13	219,38	33,11	40,44	49,48	60,33	6,57	5,39	4,43	3,64
19	215,01	214,02	216,86	217,06	33,36	40,44	49,90	60,83	6,45	5,29	4,35	3,57
18	212,55	211,70	214,58	214,74	33,61	40,77	50,33	61,34	6,32	5,19	4,26	3,50
17	210,08	209,38	212,31	212,42	33,75	40,97	50,59	61,65	6,22	5,11	4,20	3,45
16	207,03	206,48	209,46	209,52	34,02	41,32	51,05	62,19	6,09	5,00	4,10	3,37
15	205,14	204,74	207,76	207,78	34,28	41,67	51,50	62,72	5,98	4,91	4,03	3,31
14	201,83	202,08	205,09	205,38	34,45	42,00	51,91	63,31	5,86	4,81	3,95	3,24
13	198,40	199,12	202,03	202,40	34,73	42,45	52,45	64,00	5,71	4,69	3,85	3,16
12	193,66	194,84	197,64	198,11	35,04	42,93	53,03	64,74	5,53	4,54	3,73	3,06
11	191,01	192,64	195,34	195,89	35,21	43,25	53,41	65,23	5,42	4,45	3,66	3,00
10	188,57	190,47	193,26	193,89	35,51	43,69	53,98	65,96	5,31	4,36	3,58	2,94
9	180,01	181,91	184,79	185,42	34,72	42,73	52,86	64,60	5,18	4,26	3,50	2,87
8	172,74	173,25	176,20	176,84	34,28	41,87	51,86	63,39	5,04	4,14	3,40	2,79
7	163,33	165,24	168,28	168,91	33,24	40,95	50,79	62,08	4,91	4,04	3,31	2,72
6	158,08	159,74	162,75	163,71	33,86	41,67	51,70	63,34	4,67	3,83	3,15	2,58
5	153,91	155,42	158,09	159,19	34,52	42,45	52,58	64,48	4,46	3,66	3,01	2,47
4	148,87	150,21	152,54	153,78	35,33	43,41	53,69	65,92	4,21	3,46	2,84	2,33
3	144,27	145,45	147,44	148,82	36,07	44,28	54,67	67,20	4,00	3,28	2,70	2,21
2	140,00	141,02	142,66	144,18	36,84	45,19	55,68	68,54	3,80	3,12	2,56	2,10
1	136,35	137,68	139,36	141,20	36,98	45,48	56,06	69,18	3,69	3,03	2,49	2,04
0	133,09	134,39	135,98	137,70	37,16	45,69	56,30	69,44	3,58	2,94	2,42	1,98
-1	131,33	132,58	134,09	135,69	37,34	45,91	56,55	69,69	3,52	2,89	2,37	1,95
-2	129,56	130,77	132,20	133,69	37,68	45,75	55,64	67,68	3,44	2,86	2,38	1,98
-3	127,79	128,97	130,31	131,68	37,92	45,45	54,54	65,46	3,37	2,84	2,39	2,01
-4	126,03	127,16	128,42	129,67	38,17	45,15	53,45	63,26	3,30	2,82	2,40	2,05
-5	124,26	125,35	126,53	127,66	38,45	44,87	52,39	61,13	3,23	2,79	2,42	2,09
-6	122,49	123,55	124,64	125,65	38,77	44,60	51,32	59,00	3,16	2,77	2,43	2,13
-7	120,72	121,74	122,75	123,64	39,11	44,59	50,83	57,89	3,09	2,73	2,41	2,14
-8	116,49	117,56	118,77	119,25	39,16	44,56	50,76	57,47	2,97	2,64	2,34	2,07
-9	114,20	115,35	116,69	117,05	39,12	44,49	50,68	57,24	2,92	2,59	2,30	2,04
-10	111,91	113,14	114,62	114,85	39,08	44,42	50,60	57,01	2,86	2,55	2,27	2,01
-11	109,61	110,93	112,54	112,93	39,04	44,35	50,51	56,90	2,81	2,50	2,23	1,98
-12	107,32	108,71	110,47	111,01	38,99	44,27	50,42	56,80	2,75	2,46	2,19	1,95
-13	105,02	106,50	108,39	109,09	38,95	44,19	50,33	56,69	2,70	2,41	2,15	1,92
-14	102,73	104,29	106,31	107,17	38,90	44,11	50,24	56,57	2,64	2,36	2,12	1,89
-15	100,43	102,08	104,24	105,25	38,85	45,35	53,19	61,68	2,59	2,25	1,96	1,71