



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

TERMICKÉ ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ JAKO KLÍČOVÝ PRVEK EFEKTIVNÍCH SYSTÉMŮ ODPADOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ

EFFECTIVE UTILIZATION OF MUNICIPAL SOLID WASTE IN HEAT AND POWER SYSTEMS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Ondřej Putna

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.

BRNO 2020

ABSTRAKT

Předkládaná dizertační práce je zaměřena na problematiku energetického využití odpadů. Svým zaměřením přispívá do optimalizačních modelů dlouhodobě vyvíjených na pracovišti autora, které slouží pro simulaci toků v odpadovém hospodářství a k hledání optimální strategie nakládání s odpady. Hlavním cílem je posouzení potenciálu uplatnění tepla vyrobeného v jednotkách energetického využití odpadů jakožto klíčového faktoru pro ekonomiku těchto zařízení. Práce tedy představuje aktivitu na pomezí oborů odpadového hospodářství a teplárenství. V rámci jejího zpracování byly postupně vytvořeny dílčí matematické modely, pro jejichž vznik bylo nutné shromáždit vstupní data, zejména v souvislosti se sítěmi centrálního zásobování teplem. Tyto modely byly následně využity v komplexním optimalizačním nástroji pro posouzení integrace zařízení energetického využití odpadů do teplárenských systémů. Kromě ekonomického vyhodnocení je možné tento nástroj využít také pro odhad dopadu investičních záměrů v rámci sítí centrálního zásobování teplem na životní prostředí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Energetické využití odpadů, technicko-ekonomický model, optimalizační nástroj NERUDA, centrální zásobování teplem

ABSTRACT

The dissertation thesis is focused on the issue of energy recovery of waste. It contributes to optimization models developed in the author's workplace in the long term, which serve to simulate material flows in waste management and to search for an optimal waste management strategy. The main objective is to assess the potential for the use of heat produced in waste-to-energy plants as a key factor for the economy of these facilities. The thesis therefore represents an activity on the border of the fields of waste management and heating. Partial mathematical models were developed within the scope, for which it was necessary to collect input data, especially in relation with district heating networks. These models were subsequently used in a comprehensive optimization tool to assess the integration of waste-to-energy plants into heating systems. In addition to the economic evaluation, this tool can also be used to estimate the impact of investment plans within the district heating networks on the environment.

KEY WORDS

Waste-to-energy, technical-economic model, NERUDA optimization tool, district heating

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PUTNA, O. Termické zpracování odpadů jako klíčový prvek efektivních systémů odpadového hospodářství. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2020. 119 s. Školitel prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem dizertační práci vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Petra Stehlíka, CSc., dr. h. c., na základě vlastních poznatků získaných při studiu a konzultací s odborníky a že jsem veškeré literární a obrazové prameny správně a úplně citoval.

V Brně dne 4.10.2020

.....

Ing. Ondřej Putna

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto školiteli prof. Ing. Petru Stehlíkovi, CSc., dr. h. c., za odborné vedení a zabezpečení mého studia, dále pak doc. Ing. Martinu Pavlasovi, Ph.D. za konzultace, množství cenných rad a připomínek k aktivitám, které vedly k vypracování předkládané dizertační práce.

Tato práce vznikla v rámci řešení strategického výzkumného projektu č. TE02000236 "Waste-to-Energy Competence Centre" (WtECC) a projektu "Laboratoř integrace procesů pro trvalou udržitelnost" č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_003/0000456 (SPIL).

OBSAH

Seznam obrázků.....	7
Seznam tabulek	10
Seznam použitých zkratek a symbolů.....	11
Úvod	15
Definice stěžejních kritérií a parametrů	18
1 Legislativa	20
1.1 Energetická účinnost R1	24
2 Energetické využití odpadů na území ČR.....	26
2.1 Produkce spalitelných odpadů	27
3 Centrální zásobování teplem a význam pro udržitelnost projektů <i>EVO</i> ..	29
4 Dizertační práce v kontextu komplexních optimalizačních nástrojů.....	32
4.1 Optimalizační nástroj <i>NERUDA</i>	32
4.2 Cíle dizertační práce	34
5 Technologie energetického využití odpadů.....	36
5.1 Příjem, skladování a manipulace s odpadem	36
5.2 Spalovací zařízení a utilizace tepla	37
5.3 Čištění spalin	38
5.4 Energocentrum	40
5.4.1 Protitlaká turbína	40
5.4.2 Kondenzační odběrová turbína	42
5.5 Ekonomika <i>ZEVO</i>	43
5.5.1 Provozní náklady a výnosy	45
5.5.2 Investiční náklady	48
5.5.3 Personální obsazení	50
5.5.4 Náklady na zpracování odpadu	51
6 Sítě <i>CZT</i> na území ČR.....	53
6.1 Analýza	53
6.2 Cíle	53
6.3 Výsledky	54
7 Dílní technicko-ekonomické modely	56
7.1 Nerovnoměrnost dodávky tepla	56
7.1.1 Analýza	57
7.1.2 Cíle	59

7.1.3	Výsledky	61
7.2	Modely turbogenerátorů	64
7.3	Akumulace tepla	66
7.3.1	Analýza	66
7.3.2	Cíle	67
7.3.3	Výsledky	68
8	Komplexní úloha modelování synergie ZEVO a dalších zdrojů tepla.....	71
8.1	Náhrada původního tepelného zdroje souborem ZEVO A plynová kotelna	71
8.1.1	Analýza	72
8.1.2	Cíle	72
8.1.3	Výsledky	72
8.2	Integrace ZEVO do sítě CZT s existujícím tepelným zdrojem	78
8.2.1	Příklad stanovení ceny tepla a nalezení optimálního režimu provozu v konkrétní lokalitě	80
8.3	Úspora CO ₂ vlivem náhrady tepla v CZT ze ZEVO	82
8.3.1	Analýza	82
8.3.2	Cíle	84
8.3.3	Metodika	84
8.3.4	Matematický model	85
8.3.5	Případová studie	90
9	Shrnutí.....	95
9.1	Budoucí práce	97
	Přehled publikací	99
	Seznam použité literatury	101
	Přílohy	111
	Příloha 1: Odpady vhodné pro energetické využití	111
	Příloha 2: Seznam sítí CZT na území ČR s dodávkou tepla nad 100 TJ/rok, data 2017	115

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Nakládání s komunálními odpady v Evropě v roce 2014 [8]	16
Obr. 2 Hierarchie nakládání s odpady	23
Obr. 3 Mapa současných zařízení EVO v ČR	27
Obr. 4 Města s existujícími sítěmi CZT na území EU, upraveno dle [39].....	29
Obr. 5 Schéma uspořádání sítě CZT [46]	31
Obr. 6 Princip výpočtového nástroje NERUDA, upraveno na základě [47]	32
Obr. 7 Cíle dizertační práce v kontextu komplexních optimalizačních nástrojů.....	34
Obr. 8 Schéma technologie EVO se zvýrazněným exportem vyrobené energie	36
Obr. 9 Závislost počtu linek na kapacitě [54]	38
Obr. 10 Aparátová skladba souboru čištění spalin	40
Obr. 11 Zapojení protitlaké turbíny, upraveno na základě [59].....	41
Obr. 12 Příklad provozu protitlaké turbíny [60]	42
Obr. 13 Zapojení kondenzační odběrové turbíny [59].....	42
Obr. 14 Příklad provozu kondenzační odběrové turbíny [60]	43
Obr. 15 Příklad – schéma možných materiálových toků a energetických produktů vystupujících z provozu EVO.....	45
Obr. 16 Příklad výnosového koláče pro malé EVO (předpoklady: kapacita EVO 20 kt/rok, cena tepla 200 Kč/GJ, cena SKO na bráně 2 300 Kč/t, uplatněno 70 % vyrobeného tepla)	46
Obr. 17 Příklad nákladového koláče pro malé EVO (předpoklady: kapacita EVO 20 kt/rok, cena tepla 200 Kč/GJ, cena SKO na bráně 2 300 Kč/t, uplatněno 70 % vyrobeného tepla)	46
Obr. 18 Příklad výnosového koláče pro velké EVO (předpoklady: kapacita EVO 200 kt/rok, cena tepla 200 Kč/GJ, cena SKO na bráně 2 300 Kč/t, uplatněno 70 % vyrobeného tepla)	47
Obr. 19 Příklad nákladového koláče pro velké EVO (předpoklady: kapacita EVO 200 kt/rok, cena tepla 200 Kč/GJ, cena SKO na bráně 2 300 Kč/t, uplatněno 70 % vyrobeného tepla)	47
Obr. 20 Složení investičních nákladů stavební a strojní části technologie ZEVO	48
Obr. 21 Závislost měrných a absolutních investičních nákladů zařízení EVO na kapacitě [68].....	49
Obr. 22 Investiční náklady technologie EVO v jedno a dvojlínkovém provedení	49
Obr. 23 Shrnutí vstupů a výstupů T-E modelu “Flexi”	52
Obr. 24 Sítě CZT na území ČR s roční dodávkou tepla nad 100 TJ [70].....	54

Obr. 25 Struktura sítě CZT – příklad Ústí nad Labem	55
Obr. 26 Diagram dodávky tepla do sítě CZT v průběhu dne – příklad v konkrétní lokalitě	56
Obr. 27 Diagram dodávky tepla do sítě CZT v průběhu roku, převzato z [60]	57
Obr. 28 Závislost ceny na bráně na kapacitě při uvažování dat o dodávkách tepla na různé časové úrovni pro konkrétní lokalitu	58
Obr. 29 Příklady průběhu dodávek tepla do sítě CZT	59
Obr. 30: Režimy dodávky tepla	60
Obr. 31: Příklad měsíční dodávky tepla.....	61
Obr. 32: Závislost korekčního koeficientu na poměru měsíčního požadavku v síti CZT a maximální teoretické měsíční dodávky ze zařízení EVO	62
Obr. 33: Korekční koeficienty zohledňující minimální výkon dalšího tepelného zdroje	63
Obr. 34: Závislost množství uplatněného tepla z jednotky EVO na minimálním výkonu dalšího zdroje tepla při různých minimálních dobách jeho odstávky.....	64
Obr. 35: Investiční náklady parních turbín	65
Obr. 36: Schéma využití akumulace tepla	67
Obr. 37: Vliv akumulace na dodávku tepla do sítě CZT	68
Obr. 38: Závislost ziskovosti investice do akumulčních nádrží na kapacitě akumulace	69
Obr. 39: Závislost optimální kapacity akumulace tepla a maximálního zisku na kapacitě ZEVO.....	70
Obr. 40 Příklad pokrytí poptávky po teple ze ZEVO a PK	73
Obr. 41 Závislost nákladů na provoz plynové kotelny vztažených na dodané teplo	75
Obr. 42: Závislost IRR na kapacitě ZEVO pro varianty velikosti CZT, cena tepla 280 Kč/GJ	76
Obr. 43: Model akceptovatelné ceny tepla ze ZEVO	77
Obr. 44: Princip výroby a dodávky energie pro model výpočtu ceny tepla	78
Obr. 45: Blokové schéma vstupující do modelu synergie zařízení EVO s dalším tepelným zdrojem Pozn.: FK – fluidní kotel	79
Obr. 46 Princip výpočtu ceny tepla z jednotky EVO	81
Obr. 47 Schéma vstupů a výstupů optimalizačního modelu.....	86
Obr. 48 Ilustrace principu multikriteriální optimalizace.....	90
Obr. 49 Provoz kotlů teplárny při $bn = 0,7$, $bp = 0,5$ v průběhu roku	92
Obr. 50 Emise CO ₂ pro různé režimy provozu	92

Obr. 51: Schéma scénářového přístupu pro návrh ZEVO v lokalitě s dalším tepelným zdrojem se zvýrazněným modelů, které jsou cílem práce 96

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Prognóza produkce SKO a OO v ČR	28
Tab. 2 Dosažitelné hodnoty emisí dle návrhu BREF 2017, srovnání s hodnotami dle platného BREF 2006 a platnými emisními limity	39
Tab. 3 Personální obsazení navržené varianty, na základě [66]	50
Tab. 4: Uvažované náklady plynové kotelny	74
Tab. 5 Podíl jednotlivých nákladů na ceně tepla bez DPH [40]	82
Tab. 6 Variabilní náklady a emise CO ₂ samostatně stojící teplárny	91
Tab. 7 Výnosnost projektů ZEVO v závislosti na kapacitě	93
Tab. 8 Náklady na úsporu CO ₂	93

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
BRKO	biologicky rozložitelný komunální odpad
BRO	biologicky rozložitelný odpad
CZT	centrální zásobování teplem
EIA	environmental impact assessment – posouzení vlivu na životní prostředí
ERÚ	Energetický regulační úřad
EVO	energetické využití odpadů
FTE	<i>full-time equivalent</i> – počet zaměstnanců přepočtený na plný pracovní úvazek
GWP	<i>global warming potential</i> – potenciál globálního oteplování
HV	horká voda
IRR	<i>internal rate of return</i> – vnitřní výnosové procento
KO	komunální odpad
KOT	kondenzační odběrová turbína
KVET	kombinovaná výroba elektřiny a tepla
LHV	lower heating value – výhřevnost
MBÚ	mechanicko-biologická úprava
NPV	<i>net present value</i> – čistá současná hodnota
OH	odpadové hospodářství
OO	objemný odpad
ORP	obec s rozšířenou působností
PK	plynová kotelna
PP	<i>payback period</i> – doba návratnosti
PT	protitlaková turbína
ROI	<i>return of investments</i> – návratnost investic
SHM	superhrubá mzda
SKO	směsný komunální odpad
T-E model	technicko-ekonomický model
TAP	tuhé alternativní palivo

TKO	tuhý komunální odpad
TZL	tuhé znečišťující látky
ÚPI	Ústav procesního inženýrství
ZEVO	zařízení energetického využití odpadů

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
a_1	-	Regresní koeficient pro výpočet elektrického výkonu turbíny
a_2	-	Regresní koeficient pro výpočet elektrického výkonu turbíny
b_n	-	Koeficient určující důraz na ekonomické hledisko
b_p	-	Koeficient určující důraz na environmentální hledisko
c_{H_2O}	kJ/kg·K	Měrná tepelná kapacita vody
d^D	MWh/den	Poptávka po teple
E_f	GJ/r	Roční energetický vstup do systému z paliv přispívajících k výrobě páry
E_i	GJ/r	Roční dodaná energie bez E_w a E_f
E_p	GJ/r	Roční množství vyrobené energie ve formě tepla nebo elektřiny pro výpočet faktoru R1
E_w	GJ/r	Roční dodaná energie v podobě výhřevnosti odpadu
k	-	Korekční koeficient pro zohlednění fluktuací v poptávce po teple
m_{CO_2}	t	Množství vyprodukovaného CO ₂
$m_{CO_2_{min}}$	t	Minimální množství vyprodukovaného CO ₂
n_{min}	Kč	Minimální rozdíl variabilních nákladů a výnosů z prodeje elektřiny
n_r	Kč	Rozdíl variabilních nákladů a výnosů z prodeje elektřiny
n_{var}	Kč	Celkové variabilní náklady na provoz kotle

o	%	Podíl mezi tokem páry do odběru a tokem, který pokračuje do kondenzačního stupně
p_{e1}	MPa	Tlak v odběru
p_{e2}	MPa	Výstupní tlak
p_i	MPa	Vstupní tlak
P_{el}	MW _e	Elektrický výkon turbíny
p_v	%	Pokles výkonu v závislosti na tlakovém spádu
P_{el}	MW _e	Elektrický výkon turbogenerátoru
P_{elMAX}	MW _e	Maximální elektrický výkon turbíny
P_{elMIN}	MW _e	Minimální elektrický výkon turbíny
$P_{Qmax-CZT}$	MW _t	Maximální tepelný výkon do sítě CZT
$P_{QmaxPOT}$	MW _t	Maximální tepelný výkon z kondenzační odběrové turbíny
$P_{QmaxPPT}$	MW _t	Maximální tepelný výkon z protitlaké turbíny
P_{thin}	MW _t	Tepelný příkon turbíny
P_{thout}	MW _t	Výstupní tepelný výkon z turbíny
Q_{ac}	GJ	Množství akumulovaného tepla
Q_{OST}	GJ/r	Teplo dodané z ostatních tepelných zdrojů
Q_{POT}	GJ/r	Teplo dodané z kondenzační odběrové turbíny
Q_{PPT}	GJ/r	Teplo dodané z parní protitlaké turbíny
$Q_{skut.}^{EVO}$	GJ	Skutečná měsíční dodávka tepla
$Q_{teor.}^{EVO}$	GJ	Teoretická měsíční dodávka tepla
r	Kč	Výnosy z prodeje elektřiny
$R1$	-	Faktor vyjadřující energetickou účinnost ZEVO dle směrnice EU 2008/98/ES
t_1	°C	Minimální přípustná teplota akumulární vody
t_2	°C	Maximální přípustná teplota akumulární vody
V_{ac}	m ³	Objem akumulární nádrže

y^B	MWh/den	Výstupní teplo z kotle pro účely CZT
y^{TG}	MWh/den	Výstupní teplo z turbíny pro účely CZT
z	%	Procentuální zatížení turbíny
ε_{CO_2}	kg/MWh _e	Emisní faktor pro energetický mix
η^{TG}	%	Elektromechanická účinnost turbíny
θ^B	binární	Pomocná binární proměnná definující režim provozu kotle
θ^{TG}	binární	Pomocná binární proměnná definující režim provozu turbíny
v^B	MW _t	Výkon kotle
v_{max}^B	MW _t	Maximální výkon kotle
v_{min}^B	MW _t	Minimální výkon kotle
ρ_{H_2O}	kg/m ³	Hustota vody
γ_{CO_2}	kg/MWh	Emisní faktor CO ₂ kotle
φ_{el}	Kč/MWh _e	Prodejní cena elektřiny
φ_{var}	Kč/GJ	Náklady na jednotku tepelné energie z kotle

ÚVOD

Produkce komunálních odpadů (KO) je celosvětově na vzestupu, přičemž nejkritičtější situace z hlediska produkovaného množství je v rozvinutých zemích, včetně EU. Produkce odpadů a nevhodné nakládání s nimi značně přispívá k mnoha globálním environmentálním problémům, jako je poškození ekosystémů, změna klimatu nebo vyčerpání dostupných surovinových zdrojů [1]. Tento strmý růst vznikajícího odpadu nezbytně vyžaduje nové přístupy pro rozvoj efektivního odpadového hospodářství (OH).

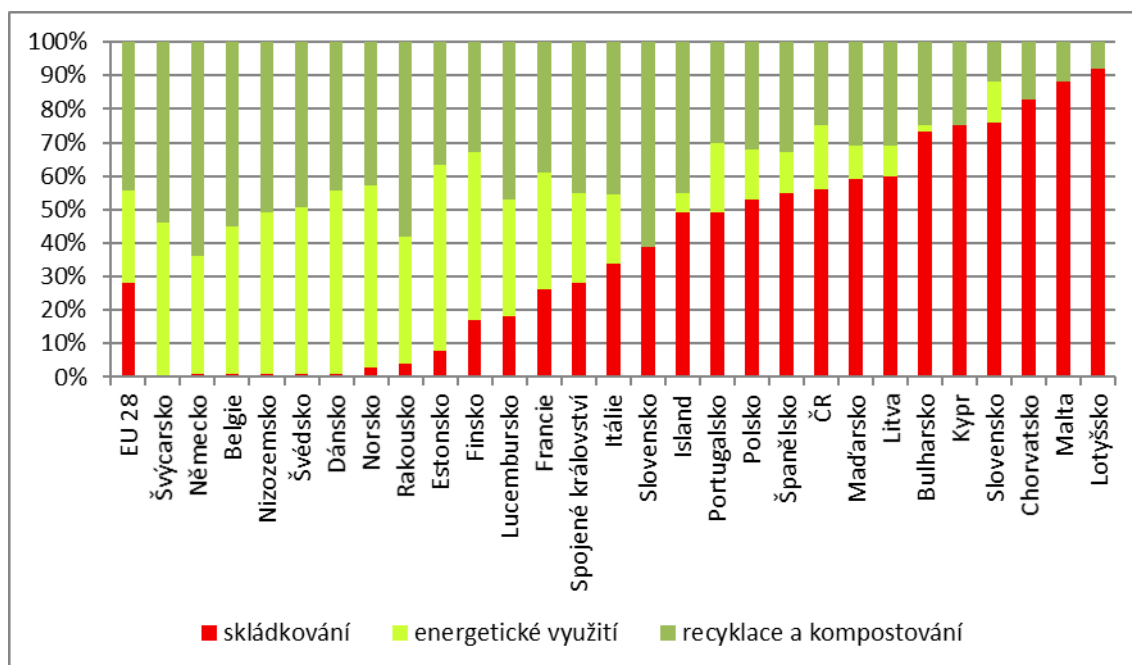
Směrnicí Evropského parlamentu a Rady č. 98/2008 ze dne 19. listopadu 2008 [2] byla stanovena hierarchie nakládání s odpady, která řadí materiálové využití (recyklaci) před využití energetické a skládkování považuje za nejhorší způsob nakládání. Materiálové využití je často nákladné a nelze ho použít pro všechny druhy odpadu [3]. V souvislosti s balíčkem oběhového hospodářství (tzv. „circular economy package“), který byl přijat EU v roce 2018 [4], byly zavedeny nové cíle pro nakládání s KO. V roce 2035 by mělo být skládkováno pouze 10 % KO a recyklováno alespoň 65 % KO a obalových materiálů. Při dotřídování KO z odděleného sběru, jako jsou zejména plasty, zákonitě vzniká velké množství sekundárního odpadu, který není technicky nebo ekonomicky možné materiálově využít. Energetické využití odpadů (EVO) tím pádem plní důležitou úlohu i při plánované vysoké míře separace. Jak vyplývá z předchozího textu, v souvislosti s EVO se za odpady vhodné pro tento druh zpracování považují právě KO, tedy odpady skupiny 20 dle katalogu odpadů (viz kap. 1). Legislativou je KO definován jako „veškerý odpad vznikající při činnosti fyzických osob (domácností) na území obce“. Největší podíl (cca 60 % hm. KO) představuje směsný komunální odpad (SKO), což je zbytková složka, kterou není možné v dnešní době efektivně třídit a materiálově využít.

EVO představuje vhodnou alternativu zejména v rozvojových zemích. Nejenže pomáhá odstraňovat stále rostoucí množství odpadů, ale může být také doplňkovým zdrojem energie nahrazujícím primární paliva. Vzhledem k tomu, že více než 80 % celosvětové energie pochází z fosilních paliv [5], může hrát EVO důležitou úlohu při snižování závislosti na těchto palivech a rovněž při snižování produkce skleníkových plynů. Autor [6] provedl analýzu potenciálu globálního oteplování při různých způsobech nakládání s KO a tvrdí, že EVO může uspořit až 500 kg CO₂eq na tunu zpracovaného odpadu. V České republice bylo dle [7] v roce 2016 prostřednictvím centrálního zásobování teplem (CZT) dodáno asi 105 000 TJ tepla, z toho 94 000 TJ pocházelo z fosilních paliv. Jak je dále popsáno v kap. 2.1, v roce 2024 je možné uvažovat s produkcí spalitelných odpadů (nad rámec současné úrovně EVO) okolo 2 400 kt/rok. Orientačním výpočtem je možné z tohoto množství vyrobit při výhřevnosti – „*lower heating value*“ (LHV) 10 MJ/kg a účinnosti 70 % asi 17 000 TJ tepla a nahradit tedy 18 % fosilních paliv v teplárenství.

Podle organizace CEWEP (Confederation of European Waste to Energy Plants) sdružující evropská zařízení pro energetické využití odpadů (ZEVO) bylo v roce 2014 v ČR energeticky využito 19 % KO, zatímco 25 % bylo recyklováno a 56 % uloženo na skládky [8], viz obr. 1. Zde je nutné zmínit, že metodika vykazování jak produkce, tak nakládání s odpadem se může v jednotlivých státech lišit, a není tedy možné považovat

data za stoprocentně relevantní. Z hlediska nakládání s KO lze rozdělit státy EU do tří skupin:

1. Státy s rozvinutým OH, kde je drtivá většina KO recyklována a energeticky využita a skládkování odpadů je při splnění určitých podmínek většinou úplně zakázáno. Sem patří např. Skandinávské státy, Německo nebo Nizozemsko.
2. Státy s přechodným OH, ve kterých je EVO do jisté míry rozšířeno, ale nezanedbatelná část KO je stále ukládána na skládky. V těchto zemích, mezi které je možné zařadit např. Velkou Británii [9] nebo Itálii, dochází v současné době k výstavbě nových jednotek EVO a je tedy možné pozorovat tendenci přibližování se první skupině.
3. Státy, kde stále výrazně převládá skládkování využitelných odpadů, ať už energeticky nebo materiálově, a EVO zde není vůbec nebo pouze minimálně rozšířeno. Sem se řadí většina států východní Evropy.



Obr. 1 Nakládání s komunálními odpady v Evropě v roce 2014 [8]

ČR lze podle výše zmíněného rozdělení zařadit do druhé skupiny. Do budoucna lze ale očekávat, že se podíl energeticky využitých odpadů zvýší [10]. EVO v rámci ČR bude dále popsáno v následující kapitole.

U států s pokročilejšími systémy OH je ve větší míře zastoupeno jak materiálové, tak energetické využití. Není tedy pravda, že při rozvoji EVO hrozí významnější spalování recyklovatelného odpadu kvůli naplnění kapacity, což bývá častý argument odpůrců těchto projektů. Na druhou stranu je zřejmé, že i v zemích s dobře fungujícím OH je míra materiálového využití odpadu omezená, což je dáno jak současnými možnostmi separace, tak uplatněním vytríděných složek na trhu. Pokud má být skládkování KO omezeno na minimum (10 % KO v roce 2035 dle [4]), je tedy vždy nutné zbytkový odpad využít jiným způsobem, tedy například energeticky.

V některých zemích (např. Německo nebo Rakousko) nastala situace, kdy došlo po realizaci velkého množství projektů EVO s vysokou celkovou kapacitou ke snížení produkce spalitelných odpadů v důsledku zvýšené separace či poklesu produkce odpadů z činností firem. Ve výsledku se zařízení EVO (ZEVO) v těchto zemích často potýkala s nedostatkem odpadu a vznikly zde tedy mírné nadkapacity, což v některých případech představovalo problém pro jejich ekonomiku. Existuje zde tedy možnost přeshraniční přepravy odpadu směrem z ČR, což v případě existence nadkapacit umožňuje legislativa EU.

Snahou předkládané práce je přispět k posouzení potenciálu ZEVO na území ČR zejména z pohledu technicko-ekonomického (T-E) hodnocení těchto projektů. Důraz je přitom kladen na specifické podmínky v jednotlivých lokalitách z pohledu uplatnění vyrobené energie, což je jedna z legislativních podmínek (viz kap. 1.1), a zároveň i klíčový faktor ekonomické udržitelnosti (viz kap. 5.5). K tomuto účelu byla vytvořena řada matematických modelů, které jsou postupně popsány v kap. 7.

Hlavní přínos autora spočívá ve vytvoření metodiky pro hodnocení investičních záměrů v rámci teplárenských sítí. Důraz byl v tomto případě kladen na integraci ZEVO, ale prezentovaný přístup (viz kap. 8.2) je využitelný i na další strategické změny týkající se konfigurace sítí CZT. Tato metodika a data nashromážděná během studia byla autorem dále využita k sestavení optimalizačního matematického modelu, který je blíže popsán v kap. 8. Tento model byl průběžně zdokonalován a využíván při řešení reálných úkolů pro průmyslové subjekty. Příklady provedených praktických aplikací jsou:

1. Ekonomické posouzení projektů ZEVO s ohledem na parametry všech zdrojů dodávajících teplo do sítě CZT.
2. Odhad akceptovatelné ceny tepla ze ZEVO (viz kap. 8.2)
3. Multikriteriální hodnocení projektů ZEVO z ekonomického a zároveň environmentálního hlediska (viz kap. 8.3).
4. Vyhodnocení integrace dalších technologických celků, jako jsou např. kogenerační jednotky, parní turbína nebo biomasový kotel.
5. Doporučení vhodné strategie při plánované změně palivové základny.
6. Analýza citlivosti energetických zdrojů na neurčité parametry, jako jsou budoucí změny v cenách emisních povolenek a dalších legislativních nástrojů.
7. Návrh optimální strategie provozování komplexních teplárenských soustav.

Další klíčovou oblastí využití vytvořených matematických modelů je generování vstupních dat pro komplexní logistickou úlohu optimalizace toku odpadu na vymezeném území, což je blíže popsáno v kap. 4.1.

V kap. 1 je představeno legislativní pozadí řešené problematiky. V kap. 2 a je popsán současný stav OH v ČR v souvislosti s EVO. Kap. 3 shrnuje problematiku CZT a jeho význam pro udržitelnost projektů EVO. Přínosy dizertační práce v kontextu komplexních optimalizačních nástrojů vyvíjených na ÚPI jsou představeny v kap. 4. Následuje uvedení do problematiky teplárenství v kontextu dodávky tepla ze ZEVO a popis uvažovaných technologií EVO (kap. 5). V kap. 6 je popsána rešeršní část práce v podobě analýzy teplárenských sítí na území ČR. Dále už jsou popsány praktické výstupy v podobě dílčích

T-E modelů (kap. 7), jejichž tvorba vyústila v komplexní úlohu integrace ZEVO do existující sítě CZT s dalšími tepelnými zdroji (kap. 8).

DEFINICE STĚŽEJNÍCH KRITÉRIÍ A PARAMETRŮ

V této kapitole jsou definována hlavní kritéria a parametry využívané v této práci. Jedná se zejména o kritéria pro hodnocení ekonomiky projektů EVO a energetické účinnosti.

Čistá současná hodnota

Čistá současná hodnota – „*Net present value*“ (NPV) je ekonomickým ukazatelem pro hodnocení investic, který říká, kolik finančních prostředků přinese daná investice ve zvolené době životnosti. Výhodou hodnocení investic pomocí NPV je zohlednění změny hodnoty peněz v čase. Jak vyplývá z předchozí věty, pro výpočet NPV je nutné stanovení tzv. diskontní sazby.

Vnitřní výnosové procento

Vnitřní výnosové procento – „*Internal rate of return*“ (IRR) je hlavním používaným parametrem pro hodnocení investičních záměrů v této práci. Používá se zejména pro hodnocení návratnosti investice. V praxi stanovuje investor minimální hodnotu IRR, při které se mu daná investice vyplatí. Tato hodnota bývá stanovena jako součet bezrizikové úrokové míry a určité fixní přírážky. Existuje vztah mezi IRR a NPV v tom smyslu, že pokud je hodnota IRR vyšší než diskontní sazba, je NPV na konci životnosti projektu kladné a naopak. IRR a jeho praktické využití je blíže popsáno v [11].

Akceptovatelná cena tepla ze ZEVO

Tento parametr byl definován při vytváření optimalizačních modelů jako hlavní veličina zohledňující technologii a ekonomiku teplotrenské sítě, do které je ZEVO integrováno. Za předpokladu rozdílných provozovatelů ZEVO a teplárny, kdy je vyrobené teplo ze ZEVO odkupováno a dále přeprodáváno do sítě CZT provozovatelem teplárny říká, jakou maximální cenu za GJ tepla na hranici ZEVO-teplárna (viz obr. 44) je možné požadovat, aby se tento obchod provozovateli teplárny vyplatil. Díky stanovení závislosti této ceny na množství dodaného tepla je následně možné T-E model integrovaného ZEVO zjednodušit na úroveň modelu samotného ZEVO.

Cena na bráně

Cena na bráně, neboli cena za zpracování odpadu, případně „*gate-fee*“, je v této práci využívána jako jedno z kritérií pro hodnocení ekonomiky projektů ZEVO. Tento přístup souvisí s optimalizačním nástrojem NERUDA (viz kap. 4.1), kdy je nutné nejprve pro každé potenciální ZEVO stanovit minimální cenu na bráně, která zajistí ekonomickou udržitelnost projektu. Nástrojem je následně stanoveno, zda je v daném případě k dispozici dostatek odpadu pro naplnění kapacity zařízení.

Kritérium R1

Jedná se o parametr vyjadřující energetickou účinnost ZEVO dle směrnice EU 2008/98/ES. Nejedná se však o účinnost v pravém slovasmyslu, protože jeho hodnota může být vyšší než 1. Jeho účelem je zejména srovnání efektivity využití energie

obsažené ve zpracovávaném odpadu vzhledem k účinnosti konvenčních energetických zdrojů. Toto kritérium je detailně popsáno v kap. 1.1.

1 LEGISLATIVA

Následuje stručný souhrn legislativy, která se týká problematiky dizertační práce. Nejprve jsou uvedeny příslušné směrnice EU a poté legislativa ČR.

Směrnice Evropského parlamentu a rady 1999/31/ES [12]

Hlavním bodem vyplývajícím ze směrnice 1999/31/ES o skládkách odpadů je požadavek na omezení skládkování biologicky rozložitelných komunálních odpadů (BRKO). Konkrétně pro ČR to znamená:

- do 1.1. 2010 odklonit od skládkování 25 % BRKO oproti množství z roku 1995,
- do 1.1. 2013 odklonit od skládkování 50 % BRKO oproti množství z roku 1995,
- do 1.1. 2020 odklonit od skládkování 75 % BRKO oproti množství z roku 1995.

Je třeba si uvědomit, že určitý podíl biologicky rozložitelné složky obsahuje více druhů odpadu, avšak z hlediska celkového množství je nejvýznamnější právě SKO. Podíl biologicky rozložitelných odpadů (BRO) na celkové produkci tuhých komunálních odpadů (TKO) v roce 1995 byl stanoven na 41 % hm. [13].

Směrnice evropského parlamentu a rady 2008/98/ES [2]

Tato směrnice o odpadech a o zrušení některých směrnic obsahuje hierarchii nakládání s odpady zmíněnou v úvodu a dále požadavek na dosažení minimální energetické účinnosti jednotky EVO, viz kap. 1.1.

Směrnice Evropského parlamentu a rady 2000/76/ES [14]

o spalování odpadů stanovuje podmínky pro EVO a spoluspalování odpadů. Mimo jiné definuje minimální teplotu ve spalovacím prostoru, emisní limity, požadavky na maximální obsah organického uhlíku ve strusce, požadavky na měření emisí apod.

Balíček oběhového hospodářství („Circular Economy Package“)

Tento soubor směrnic vydaný v roce 2018 je v kontextu KO reprezentován zejména třemi dokumenty. Význam těchto směrnic byl popsán v úvodu práce. Klíčové body spočívají zejména v požadavcích na snížení skládkování a zvýšení recyklace KO.

- Směrnice, která mění směrnici o skládkách odpadů - 2018/850/EU [15],
- Směrnice, která mění směrnici o odpadech - 2018/851/EU [16],
- Směrnice, která mění směrnici o obalech - 2018/852/EU [17]

Nařízení vlády č. 352/2014 Sb. [18]

o Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015–2024 implementuje do české legislativy směrnici EU 1999/31/ES. Důležitým bodem je zde předpokládaný zákaz skládkování SKO do roku 2024.

Vyhláška č. 415/2012 Sb. [19]

o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší, která nahrazuje do nedávné doby platné nařízení

vlády č. 354/2002, stanovuje emisní limity a další podmínky pro spalování odpadu, vychází ze směrnice EU 2000/76/ES a určuje tedy emisní limity pro spalování odpadu.

Zákon č. 201/2012 Sb. [20]

o ochraně ovzduší souvisí s vyhláškou č. 415/2012 Sb. a stanovuje podmínky termického využívání odpadů.

Zákon č. 100/2001 Sb. [21]

o posuzování vlivů na životní prostředí, anglicky „*Environmental Impact Assessment*“ (EIA). Projekty EVO patří mezi záměry podléhající zvláštnímu posuzovacímu řízení na základě tohoto zákona. ZEVO s roční zpracovatelskou kapacitou do 30 kt/rok podléhají nejprve zjišťovacímu řízení, podle kterého se rozhodne, jestli bude nutné projekt posoudit v regulérním posuzovacím řízení. Jeho kladné rozhodnutí je potom nutnou podmínkou pro pokračování záměru.

Vyhláška 93/2016 Sb. [22]

Tato vyhláška obsahuje tzv. katalog odpadů. Ten zařazuje všechny odpady podle katalogových čísel, která se skládají ze třech dvojčíslí. Ta označují skupinu odpadu, podskupinu odpadu a druh odpadu. Z hlediska problematiky této práce jsou významné zejména odpady skupiny 20, tedy KO a další odpady vhodné pro EVO.

Zákon č. 185/2001 Sb. [23]

o odpadech. V tomto zákoně jsou vymezeny základní pojmy a definice týkající se odpadů a požadavky na nakládání s nimi. Na základě tohoto zákona jsou získávány informace o produkci a nakládání s jednotlivými kódy odpadu dle katalogu odpadů. V souvislosti s tímto zákonem Ministerstvo životního prostředí zpracovává Plán odpadového hospodářství (POH).

Plán odpadového hospodářství (POH) ČR na období 2015 až 2024 [10]

Jako klíčový typ odpadu, který bude zcela zásadním způsobem dotčen platností legislativy po roce 2024/2030¹ (v kontextu zákazu skládkování využitelných odpadů), je SKO. V kontextu celé ČR je v současné době SKO dominantně skládkován (73 %), přičemž výsledky vylepšují regiony, kde jsou provozována současná ZEVO (Praha, Brno, Liberec, Chotkov). V ostatních krajích je procento využití (energetického nebo materiálového) v zásadě nulové. Ze systému VISOH² je relativně jednoduše zjistit, jaké množství jednotlivých druhů odpadu bylo zpracováno v konkrétním kraji. Problémem je určit toky odpadu z místa produkce na místo zpracování. Tímto problémem a s ním souvisejícím vyrovnáním dat se zabýval [24].

¹ V současné době (5/2020) je v souvislosti s připravovanou novelou zákona o odpadech diskutována varianta odkladu zákazu skládkování využitelných odpadů na rok 2030

² Veřejný informační systém odpadového hospodářství, který zpřístupňuje agregovaná data o produkci a nakládání s odpady v základním územním členění ČR, dostupný z: <https://isoh.mzp.cz/visoh>

Co se týká SKO, je dle POH ČR cílem: „*Směsný komunální odpad (po vytrídění materiálově využitelných složek, nebezpečných složek a biologicky rozložitelných komunálních odpadů) zejména energeticky využívat v zařízeních k tomu určených v souladu s platnou legislativou.*“ Navržená opatření v POH ČR vedoucí k tomuto cíli jsou například následující:

- Průběžně upravovat poplatek za skládkování využitelných KO tak, aby jeho výše znevýhodňovala skládkování těch druhů odpadů, které bude od roku 2024/2030³ zakázané skládkovat, v souladu s hierarchií nakládání s odpady, včetně SKO.
- SKO zařadit mezi odpady, u nichž se předpokládá zákaz skládkování od roku 2024/2030³.
- V adekvátní míře energeticky využívat SKO v ZEVO bez jeho předchozí úpravy.
- Podporovat budování odpovídající efektivní infrastruktury nutné k zajištění a zvýšení EVO (zejména SKO).

Evropské směrnice 2006/12/ES o odpadech a navazující 2008/98/ES o odpadech a o zrušení některých směrnic jsou zásadním předpisem, který upravuje nakládání s odpady v celé Evropské unii. Tyto směrnice definují tzv. hierarchii nakládání s odpady (viz obr. 2), kdy na prvním místě je prevence vzniku odpadu, poté jeho opětovné používání a dále recyklace následovaná energetickým využitím. Teprve odpady, které není možné již nijak využít, by měly být odstraňovány – spalováním bez energetického využití nebo skládkováním. Tato pravidla jsou promítnuta do legislativy jednotlivých států EU a tedy i ČR.

³ V současné době (5/2020) je v souvislosti s připravovanou novelou zákona o odpadech diskutována varianta odkladu zákazu skládkování využitelných odpadů na rok 2030



Obr. 2 Hierarchie nakládání s odpady

V podmínkách ČR implementuje směrnici 2006/12/ES zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech. Dlouhodobě je připravována novela tohoto zákona a jeho prováděcí vyhlášky, které by mimo jiné jasně stanovily, jaký odpad nebude možné ukládat na skládky od roku 2024/2030⁴. V poslední verzi návrhu bylo uvedeno, že nebude možné skládkovat odpad s LHV v sušině vyšší než 6,5 MJ/kg. LHV spalitelných odpadů na území ČR v současnosti převyšuje tuto hodnotu a změna se neočekává ani kolem roku 2024/2030⁴. Cílem tohoto opatření je zabránit separaci vysoce výhřevné frakce z SKO s nízkou výtežností a zbytkový odpad (stále s LHV v sušině nad 6,5 MJ/kg) legálně skládkovat jakožto „upravený odpad“ a obcházet tímto způsobem zákaz skládkování neupraveného SKO. V článku [25], na kterém se autor práce podílel, je vysvětleno, že ani limitní hodnota 6,5 MJ/kg nepředstavuje z hlediska spalitelnosti v ZEVO problém.

Evropská směrnice 1999/31/ES o skládkách odpadů je předpisem, který pro členské státy udává povinnost omezit skládkování BRKO ve srovnání se skládkovaným množstvím v roce 1995 a to:

- na 75 % do 5 let ode dne účinnosti příslušného právního předpisu zajišťujícího dosažení souladu s touto směrnicí,
- na 50 % do 8 let ode dne účinnosti příslušného právního předpisu zajišťujícího dosažení souladu s touto směrnicí,
- na 35 % do 15 let ode dne účinnosti příslušného právního předpisu zajišťujícího dosažení souladu s touto směrnicí.

Na celkovém množství skládkovaného BRKO má významný podíl SKO, který obsahuje přibližně polovinu biologické složky. Dle rozborů SKO prováděných společnostmi EKO-

⁴ V současné době (5/2020) je v souvislosti s připravovanou novelou zákona o odpadech diskutována varianta odkladu zákazu skládkování využitelných odpadů na rok 2030

KOM zaujímal bioodpad v roce 2016 17,8 %, nicméně mezi BRO lze zařadit i část spalitelné složky, která zaujímal 21,4 % (např. hygienický odpad, dřevo apod.) a část podsítné frakce (29,5 %) [26]. Členské státy, které v roce 1995 nebo v nejbližším roce předcházejícím roku 1995, a pro který jsou k dispozici data Eurostat, ukládaly více než 80 % svého KO na skládky, mohou splnění cílů odložit na ne více než čtyři roky, což je i případ ČR. POH ČR stanovuje ještě přísnější cíl, a to pokles na pouze 24 % hmotnosti BRKO ukládané v roce 1995 do roku 2020. Dle MŽP bylo v roce 1995 uloženo na skládky 1 530 kt BRKO. Dle POH to znamená povinnost skládkovat v roce 2020 maximálně 367 kt BRKO. Pro představu v roce 2017 bylo dle MŽP uloženo na skládky asi 950 kt BRKO, což ukazuje, že tento cíl pravděpodobně splněn nebude.

V případě nesplnění cílů směrnice EU hrozí jednorázová penalizace 1 750 000 EUR + denní cca 10 000 EUR [27], přičemž tyto náklady mohou být kaskádovitě přeneseny až na úroveň obcí a hrozí tedy zatížení jejich rozpočtů. Problém je neurčitost a problematičnost vyčíslení míry využití odpadů na nižších územních celcích. Tento problém byl na ÚPI řešen a publikován v rámci článku [24]

Směrnice 2000/76/ES o spalování odpadů stanovuje důležité podmínky, které je nezbytné splnit pro spalování a spoluspalování odpadu. Tato směrnice také stanovuje emisní limity pro spalování a spoluspalování odpadu. Vyhláška č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší tuto evropskou směrnici implementuje do právního řádu ČR.

Zákon č. 100/2001 Sb., novelizován zákonem č. 39/2015, mimo jiné určuje záměry podléhající zvláštnímu posuzovacímu řízení na základě tohoto zákona. V rámci tohoto řízení, též známého jako EIA (Environmental Impact Assessment), dochází k odbornému posouzení vlivů na veškeré složky životního prostředí.

1.1 ENERGETICKÁ ÚČINNOST R1

Energetická účinnost definovaná ve směrnici EU 2008/98/ES je jedním z hlavních výrobních indikátorů u ZEVO, který určuje, zda je v zařízení odpad využíván nebo odstraňován. Je to parametr, který je označován jako účinnost, ale toto označení je mírně zavádějící. Tato veličina je bezrozměrné kritérium, které za určitých okolností a v důsledku dosazování v tzv. ekvivalentních jednotkách může přesahovat hodnotu 1. Vzorec pro výpočet energetické účinnosti je uveden v příloze č. 12 Zákona o odpadech a je v následujícím tvaru:

$$\text{Energetická účinnost R1} = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97 \cdot (E_w + E_f)} \quad (1)$$

kde:

- E_p se rozumí roční množství vyrobené energie ve formě tepla a elektřiny. Vypočítá se tak, že se energie ve formě elektřiny vynásobí hodnotou 2,6 a teplo vyrobené pro komerční využití hodnotou 1,1 (GJ/rok).

- E_f se rozumí roční energetický vstup do systému z paliv přispívajících k výrobě páry (GJ/rok).
- E_w se rozumí roční množství energie obsažené ve zpracovávaných odpadech vypočítané za použití nižší čisté LHV odpadů (GJ/rok).
- E_i se rozumí roční dodaná energie bez E_w a E_f (GJ/rok). 0,97 je činitelem energetických ztrát v důsledku vzniklého popela a vyzařování.

Tento vzorec se použije v souladu s referenčním dokumentem o nejlepších dostupných technikách pro spalování odpadů. Minimální požadovaná výše energetické účinnosti pro využívání odpadů způsobem R1 pro zařízení, která získala souhlas k provozu po 31. prosinci 2008, se rovná hodnotě **0,65**.

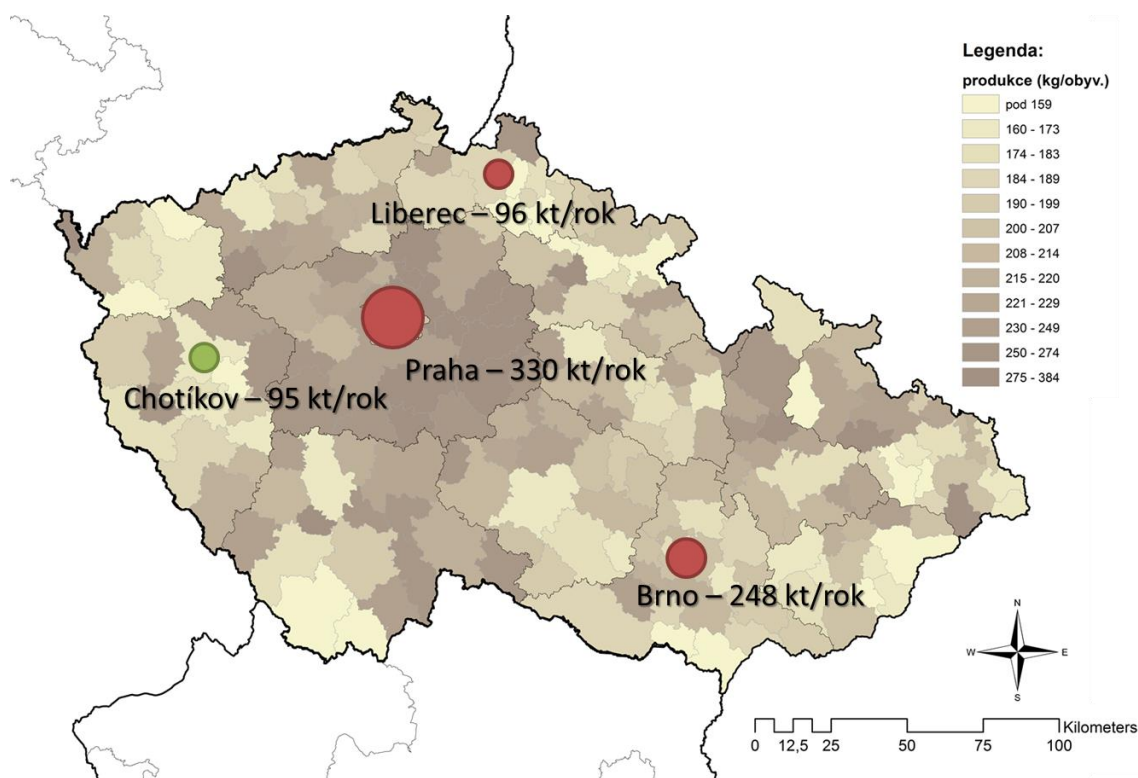
Zařízení, které nesplní prahovou hodnotu 0,65 je kategorizováno jako zařízení pro odstranění odpadů a je na něj takto nahlíženo i z pohledu hierarchie nakládání s odpady. Stejně jako skládkování se jedná o nejméně preferovanou formu, která nepřispívá ke splnění regionálních i národních cílů v oblasti využití odpadů. Hodnocení evropských ZEVO z pohledu dosažených účinností R1 bylo provedeno v rámci zprávy organizace CEWEP [28]. Je zřejmé, že nejnižší účinnosti dosahují zejména zařízení malých kapacit produkující pouze elektřinu, z nichž pouze 37 % dosáhlo požadované hodnoty 0,6.

Z koeficientu E_p je zřejmé, že dosažená hodnota R1 přímo závisí na vyrobené tepelné a elektrické energii. Jak už bylo zmíněno v úvodu, u ZEVO není technologicky možné dosáhnout při přijatelných investičních a provozních nákladech vysokých parametrů páry, což platí zvláště u technologií nižších kapacit (rozlišení kapacit bude vysvětleno v kap. 5). Z toho vyplývá, že kromě ekonomických aspektů je klíčové zajištění dostatečného odbytu tepla i pro dosažení požadované účinnosti R1. Problematikou posouzení energetické účinnosti EVO v kontextu rovnice R1, jejími alternativami a jejich výhodami a nevýhodami se komplexně zabývá [29].

2 ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADŮ NA ÚZEMÍ ČR

Jak již bylo zmíněno v úvodní části práce, na území ČR jsou v současné době provozována čtyři ZEVO o vyšší zpracovatelské kapacitě (viz mapa na obr. 3). Provoz prvního zařízení byl zahájen v 80. letech v Brně. Na konci 90. let bylo následně spuštěno ZEVO v Praze (největší na území ČR) a také v Liberci. Poslední ZEVO, kde je zpracováván neupravený SKO, je zařízení v Chotíkově u Plzně. Základní informace o těchto jednotkách jsou uvedeny níže:

1. **Praha-Malešice** – ZEVO provozované společností Pražské služby, a.s. s povolenou kapacitou 330 kt/rok po plánované rekonstrukci v roce 2022 [30]. Do tohoto zařízení je svážen SKO výhradně z území Prahy. Zařízení disponuje čtyřmi zpracovatelskými linkami. Průměrný parní výkon jedné linky je 37 t/h při parametrech páry 1,2 MPa a 230 °C [31]. Část vyrobené páry je dodávána přímo odběratelům jako technologická pára. Zbytek se využívá k ohřevu horké vody a výrobě elektřiny. Zařízení je napojeno na síť CZT s roční dodávkou cca 850 TJ.
2. **Brno** – ZEVO provozované společností SAKO Brno, a.s. s kapacitou 248 kt/rok. Zařízení sestává ze dvou kotlů – každý s kapacitou 14 t odpadu/h a výrobou páry cca 40 t/h při parametrech 4 MPa a 400 °C [32]. Zařízení je napojeno na síť CZT města Brna, jehož teplárenská soustava je vytápěna převážně zemním plynem. Navrhovaný provozní režim v dokumentaci EIA počítá s dodávkou tepla 580 TJ/rok. Dodávka tepla je realizována ve formě páry z regulovaného odběru o tlaku 1,1 MPa a teplotě 220°C. V současné době se uvažuje o rozšíření zařízení o další kotel a zvýšení kapacity.
3. **Liberec** – ZEVO provozované společností TERMIZO, a.s. má kapacitu 96 kt/rok. Odpad je svážen především z měst Liberec, Jablonec nad Nisou a okolí. Zařízení sestává z jedné technologické linky s kapacitou v rozmezí 6-18 t/h a parním výkonem 43 t/h páry o teplotě 400°C a tlaku 4,3 MPa [33]. Tato pára je primárně využita k výrobě elektrické energie v protitlaké turbíně (PT) (druhy turbín využívaných v ZEVO jsou ve větším detailu popsány v kap. 5.4). Pára za turbínou (230°C, 0,75 MPa) je dále využita v systému CZT a k technologickým účelům. Jednotka je dále vybavena kondenzační turbínou, která je v provozu v letním období. Roční dodávka tepelné energie je cca 700 TJ/rok.
4. **Chotíkov** – ZEVO provozované společností Plzeňská teplárenská, a.s. s projektovanou kapacitou 95 kt/rok má zpracovávat odpad z Plzeňského kraje. K výrobě elektřiny má být využívána kondenzační odběrová turbína (KOT). V kondenzačních výměnících bude ohřívána horká voda pro CZT. Jednotka je v současné době ve fázi zkušebního provozu [34].



Obr. 3 Mapa současných zařízení EVO v ČR

Pozn.: barevný podklad vyjadřuje predikovanou produkci SKO v roce 2020, která byla stanovena v rámci projektu [35]

2.1 PRODUKCE SPALITELNÝCH ODPADŮ

Pro plánování projektů EVO je klíčové znát množství spalitelných odpadů na určitém území, které lze energeticky využít. Protože u projektů EVO je nutné počítat s relativně dlouhou přípravnou fází a dále s životností zařízení zpravidla přes 20 let, je důležité co nejpřesněji odhadnout produkci těchto odpadů do budoucna. Autor práce se podílel na vývoji metodiky pro určení potenciálu produkce odpadů v budoucnu vhodných pro EVO.

Na základě informací z existujících ZEVO v ČR bylo vytipováno celkem 47 katalogových čísel spalitelných odpadů, které jsou nezanedbatelné z hlediska množství. Způsob jejich výběru je popsán v dokumentu [36]. V roce 2015 bylo dle systému VISOH vyprodukováno asi 7 milionů tun těchto odpadů. Většinu energeticky využitelných odpadů zaujímá SKO (62 %). Dále lze zmínit např. objemný odpad (OO) a odpady skupin 2, 15 a 19 dle katalogu odpadů (viz kap. 1). Celý výčet odpadů uvažovaných pro EVO je včetně jejich produkce a způsobu nakládání v roce 2015 uveden v Příloze 1. Při posuzování projektů EVO jsou zpravidla uvažovány zejména SKO a OO. Přestože z hlediska vyprodukovaného množství jsou důležité i jiné potenciálně spalitelné odpady, často pro ně existuje jiné vhodnější využití.

Na pracovišti ÚPI byl s využitím nástroje JUSTINE [37] proveden odhad současného potenciálu odpadu vhodného pro EVO. Byl uvažován předpoklad, že je upřednostněn vhodnější způsob nakládání dle hierarchie nakládání s odpady (viz kap. 1). Využitá metodika je podrobněji popsána v [24]. V dalším kroku byla provedena prognóza

produkce těchto odpadů s výhledem do roku 2024. Předpokladem bylo mírné zvyšování míry separace a materiálového využití vyřaditelných složek KO a s tím související snižování množství zbytkového SKO. Výsledky prognózy pro rok 2024 jsou shrnuty v tab. 1.

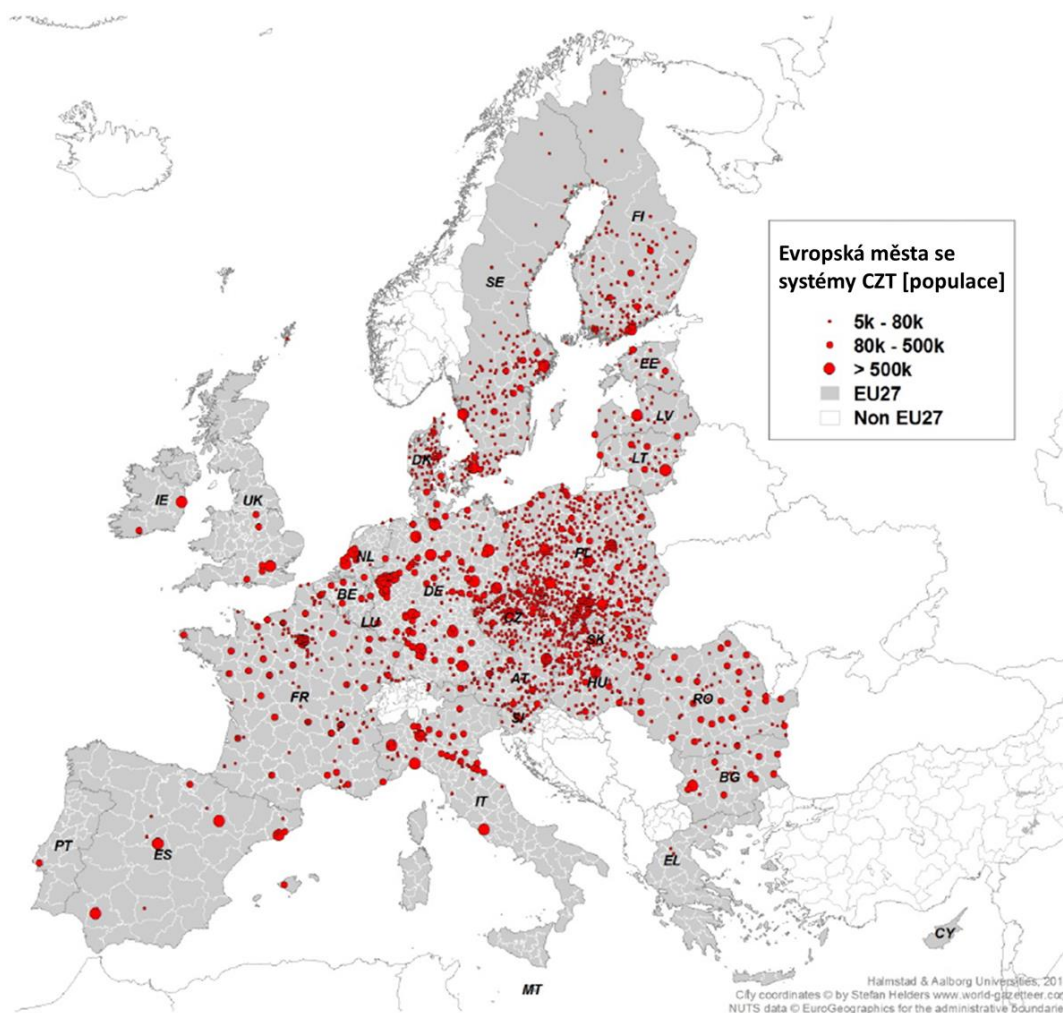
Tab. 1 Prognóza produkce SKO a OO v ČR

	2015 [kt]	2015 [kg/obyv.]	2024 [kt]	2024 [kg/obyv.]
SKO	2 158,8	202,7	1936,9	181,9
OO (všichni původci)	469,7	44,1	455,5	42,8

3 CENTRÁLNÍ ZÁSOBOVÁNÍ TEPEM A VÝZNAM PRO UDRŽITELNOST PROJEKTŮ *EVO*

Pro ekonomiku záměrů *EVO* je klíčový výnos z prodeje tepla. Tento fakt platí zejména pro zařízení nižších kapacit, kde lze z důvodu nízkých parametrů páry a účinnosti turbíny očekávat pouze zanedbatelné příjmy z prodeje elektřiny (technologické odlišnosti v závislosti na kapacitě budou popsány v kap. 5). Pro plánování projektu *EVO* je tedy důležité co nejpřesněji odhadnout, jakým způsobem a za jakou cenu bude možné teplo do sítě CZT dodávat.

Na území ČR existuje ve srovnání s převážnou částí EU historicky velké množství sítí CZT, jak ukazuje mapa na obr. 4. Systémy CZT jsou ve srovnání s decentralizovanou výrobou tepla výhodné z několika důvodů [38].



Obr. 4 Města s existujícími sítěmi CZT na území EU, upraveno dle [39]

Možná nejvýznamnějším přínosem je možnost výroby dálkového tepla kombinovaným způsobem s elektřinou, tedy kogenerační výrobou v teplárnách nebo elektrárnách. Touto cestou jsou v ČR vyráběny téměř 2/3 dálkového tepla [40]. Zdroj [41] uvádí, že využitím

kogenerace dochází v Evropě k úspoře asi 15 % skleníkových plynů ve srovnání se stavem, kdy by bylo veškeré teplo a elektřina vyráběny odděleně.

Protože s velikostí zdroje zpravidla roste účinnost energetických přeměn, dochází u centralizované výroby tepla i tímto způsobem k určitým úsporám primárních paliv. Další výhodou je možnost využití různých druhů paliv (včetně obnovitelných zdrojů nebo právě např. odpadů), což u lokálního vytápění není možné. Podstatným přínosem je zejména v dnešní době nulová náročnost obsluhy pro koncové odběratele tepla. U kapalných a pevných paliv lze také očekávat nižší znečištění na jednotku vyrobeného tepla díky více či méně sofistikovaným systémům čištění spalin a rovněž díky vyšším teplotám spalování, kterých není možné v lokálních topeništích dosáhnout. Typickým příkladem je např. odsíření spalin uhelných energetických zdrojů, kdy je možné dosáhnout účinnosti i přes 98 % [42]. Pro srovnání platí pro manuální kotle na tuhá paliva do výkonu 0,5 MW (lokální topeniště) dle Směrnice o Ekodesignu 2009/125/ES [43] od roku 2020 požadavek pro emise CO 700 mg/mN³ a pro emise NO_x 350 mg/mN³. Pro oxidy síry není stanoven žádný limit. Pro velké zdroje (nad 50 MW), kam spadá i většina tepláren, je emisní limit pro CO 250 mg/mN³, pro NO_x 300 mg/mN³, a navíc pro SO₂ 150-400 mg/mN³ podle výkonu [19]. V neposlední řadě je tepelný zdroj v rámci sítě CZT možné umístit dále od obydlených oblastí, díky čemuž dojde ke snížení vlivu emisí na obyvatele.

Nevýhodou jsou vyšší tepelné ztráty při přenosu a distribuci tepla, menší možnosti regulace a investiční náročnost v souvislosti s konkrétními podmínkami. Pokud je teplo do sítě CZT dodáváno z elektráren transformovaných na teplárny, což je v ČR relativně častý jev, bývají tyto zdroje pouze pro účely dodávky tepla někdy předimenzované. Při poklesu cen silové elektřiny a její někdy pouze vynucené výrobě se tento fakt negativně projeví na ekonomice. V návaznosti na směrnici 2010/75/EU o průmyslových emisích [44] týkající se zdrojů s instalovaným příkonem nad 50 MW, je vyžadována ekologizace velkých energetických zdrojů, což s sebou dle vyjádření Teplárenského sdružení ČR nese investiční náklady v řádu 20 mld. Kč.

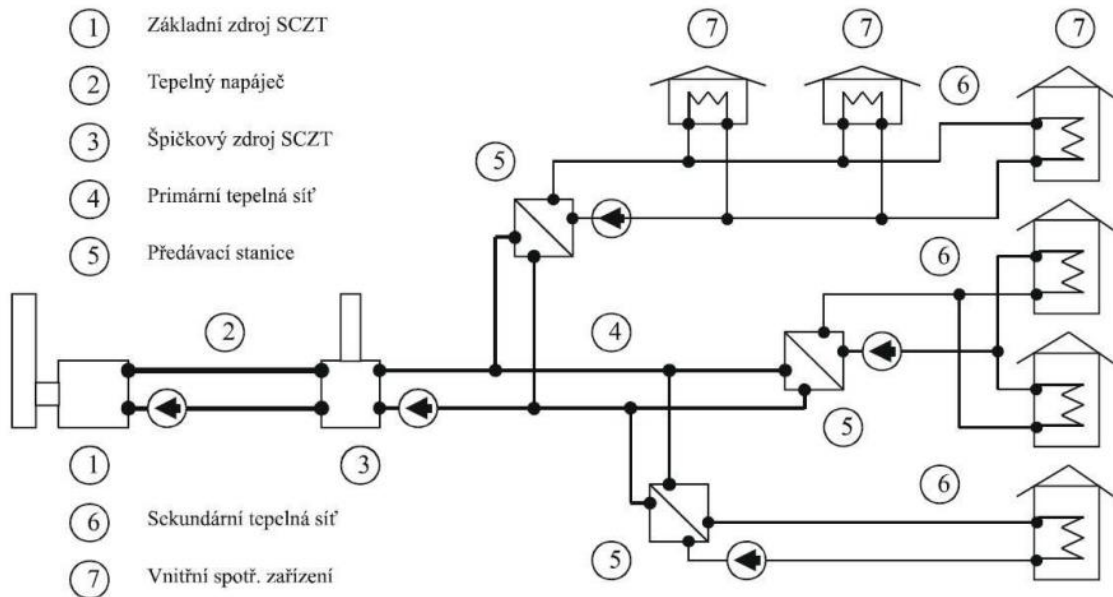
Sítě CZT lze rozdělit podle parametrů teplotnosného média do tří skupin [45]:

- Parovodní – pára o maximálních parametrech 1,8 MPa a 240°C
- Horkovodní – horká voda do 180°C, konstrukční tlaky sítě do 2,5 MPa
- Teplovodní – teplá voda do 110°C, konstrukční tlaky sítě do 1,6 MPa.

V současnosti bývají často parovodní sítě rekonstruovány na horkovodní, jejichž hlavní výhody jsou nižší tepelné ztráty a větší možnosti regulace.

Na obr. 5 je schéma možného provedení sítě CZT s jedním základním a jedním špičkovým zdrojem. Ze základního zdroje je teplo transportováno tepelným napáječem, což je v podstatě parovod nebo horkovod, sloužící primárně k přepravě tepla na určité místo a ne k jeho další distribuci, ke špičkovému zdroji. Zde případně dochází k dalšímu dohřevu teplotnosného média. Odtud pokračuje dodávka tepla prostřednictvím tzv. primární sítě CZT, která již slouží k jeho distribuci k jednotlivým předávacím stanicím. V nich již dochází k úpravě parametrů teplotnosné látky na hodnoty požadované vnitřními spotřebitelskými zařízeními – viz sekundární síť CZT. Ze sekundární sítě je teplo pomocí teplé vody rozváděno do jednotlivých domovních předávacích stanic.

Je třeba podotknout, že uspořádání sítí CZT se může v různých případech lišit. Menší sítě CZT například nebývají rozděleny na primární a sekundární rozvody, případně může primární síť plnit zároveň funkci tepelného napáječe.



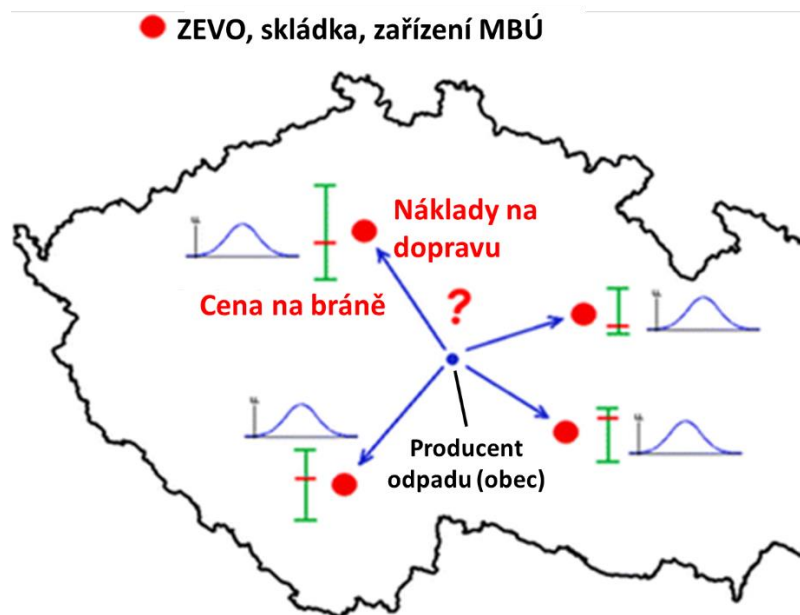
Obr. 5 Schéma uspořádání sítě CZT [46]

4 DIZERTAČNÍ PRÁCE V KONTEXTU KOMPLEXNÍCH OPTIMALIZAČNÍCH NÁSTROJŮ

V předchozím textu byl shrnut současný stav EVO v ČR a představen související legislativní rámec. Aby bylo možné dostatečně vysvětlit přínos problematiky řešené v dizertační práci, je nutné nejprve krátce představit unikátní komplexní optimalizační systém NERUDA, který byl vytvořen a je průběžně zdokonalován na pracovišti ÚPI v Sekci energetických systémů a simulačních výpočtů. V následující kapitole 4.1 je popsán princip tohoto nástroje a jeho struktura. V kap. 4.2 je pak vysvětlen přínos práce autora v kontextu jednotlivých modulů nástroje NERUDA.

4.1 OPTIMALIZAČNÍ NÁSTROJ NERUDA

Jedná se o logistickou úlohu pro optimalizaci toku odpadu na vymezeném území implementovanou v prostředí GAMS [47]. Protože mezi producenty odpadu, jeho přepravci a zpracovateli včetně zpracovatelů koncových produktů (struska, kompost, kaly atd.) existují složité vazby, je nutné tyto interakce respektovat a není možné posuzovat jednotlivé uzly odděleně. Pro odhad ekonomiky konkrétního zařízení je například nutné znát cenu za zpracování odpadu, která však bude závislá na existenci konkurenčních zařízení v okolí, která se ovlivňují navzájem. Hlavní princip nástroje NERUDA je znázorněn na obr. 6.



Obr. 6 Princip výpočtového nástroje NERUDA, upraveno na základě [47]

Producent odpadu, typicky obec, se rozhoduje, jakým způsobem naloží se svým odpadem, přičemž kritériem jsou minimální náklady, které jsou dány cenou na bráně zpracovatelského zařízení a náklady na dopravu. Řešené území, v tomto případě ČR, je rozděleno na jednotlivé uzly, např. území obcí s rozšířenou působností (ORP). Každému uzlu je přiřazena produkce odpadu a případně informace, zda má být uvažován jako potenciální lokalita pro výstavbu zařízení na zpracování odpadu, což může být v případě

KO ZEVO, zařízení mechanicko-biologické úpravy (MBÚ), skládka, monoblok ke spalování tuhých alternativních paliv (TAP) nebo úprava teplárenských fluidních kotlů pro spoluspalování TAP. Existující zařízení na území ČR nebo v příhraničních oblastech jsou do modelu zahrnuta. Každému potenciálnímu zařízení jsou přiřazeny určité parametry, zejména pak závislost požadované ceny na bráně na zpracovatelské kapacitě.

Nástroj využívá stochastického přístupu a pracuje tedy s neurčitými vstupními parametry, které jsou generovány z intervalu předpokládaných minimálních a maximálních hodnot. Jedná se např. o cenu na bráně ZEVO, kde je neurčitost dána zejména uvažovaným rozsahem požadovaného IRR (viz kap. 5.5) nebo právě cenou prodaného tepla. Následně proběhne velké množství optimalizačních výpočtů (řádově tisíce). Při každém z nich je pro aktuální soubor náhodně generovaných vstupních parametrů a aktuální scénář (např. výše skládkovacího poplatku) nalezen ekonomicky optimální stav, při kterém dojde ke splnění okrajových podmínek (zpracování veškerého vyprodukovaného odpadu, naplnění kapacit apod.). Vzhledem ke stochastickému přístupu jsou výsledkem pravděpodobnosti, se kterými nastane určitý stav, např. bude výhodná realizace ZEVO s určitou kapacitou v určité lokalitě nebo určitá obec dosáhne určité ceny za zpracování odpadu. O ekonomice jednotek EVO pojednává kap. 5.5. V práci [48] je vysvětleno celkové pozadí hodnocení investic do OH s pomocí nástrojů využívajících stochastické programování.

V poslední době je do nástroje NERUDA zahrnuto také environmentální hledisko v podobě bilance skleníkových plynů v souvislosti s transportem a zpracováním odpadů. Díky univerzálnosti nástroje je možné po nutných úpravách vstupů optimalizovat např. síť nakládání s nebezpečnými odpady, čistírenskými kaly atd. V závislosti na aktuálním nastavení modelu a různých okrajových podmínkách je možné řešit úlohy s rozdílným cílem. Jednou ze základních úloh je např. nalezení vhodných lokalit pro realizaci projektů EVO a doporučení určité zpracovatelské kapacity, kdy je minimalizována cena za zpracování odpadu pro jeho producenty. Podrobnější popis a využití nástroje NERUDA je možné nalézt např. v [49] nebo [50]. Výstupy z nástroje NERUDA umožňují například:

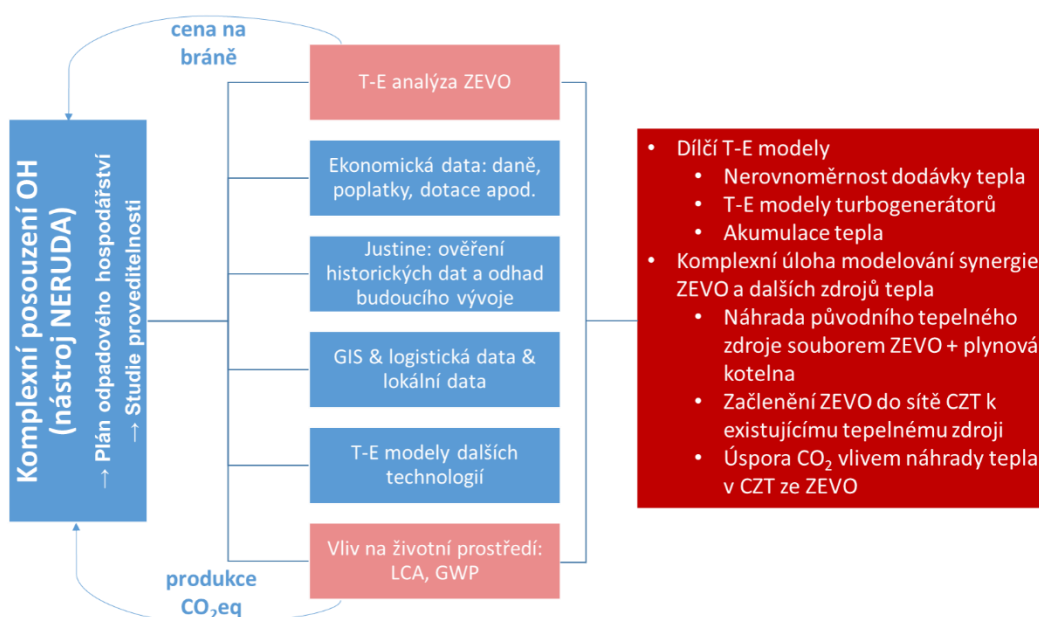
- popsat toky odpadu na daném území,
- zhodnotit atraktivitu záměrů zařízení na zpracování odpadu v jednotlivých lokalitách a posoudit možná rizika,
- navrhnout optimální logistický řetězec a lokality vhodné pro výstavbu zařízení ke zpracování odpadů,
- analyzovat navrhovaná legislativní opatření,
- provést multikriteriální optimalizaci z ekonomického a environmentálního hlediska – dát do souvislosti náklady a produkci skleníkových plynů.

Jak vyplývá z výše uvedených bodů, nástroj NERUDA je využitelný pro provozovatele nebo potenciální investory nových zařízení, kterým pomůže při rozhodování o vhodných parametrech nebo způsobu provozování. Dále také pro orgány státní správy pro podporu klíčových rozhodnutí nebo při vytváření strategických dokumentů, jako je např. POH.

4.2 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

V souvislosti s předpokládaným zákazem skládkování do roku 2024/2030⁵ (viz kap. 1) hrozí, že pokud nedojde k výstavbě dostatečných kapacit EVO v ČR, bude ve velké míře docházet právě k přepravě energeticky využitelného odpadu z ČR, což s sebou ponese značné ekonomické ztráty. Dizertační práce se svým způsobem snaží přispět k možnostem jeho efektivního využití v ČR, což s sebou ve výsledku nese ekonomické i environmentální výhody.

Hlavním cílem práce bylo vytváření T-E modelů s využitím optimalizace, které jsou dále využitelné pro komplexní hodnocení OH prostřednictvím nástroje NERUDA. Jednotlivé moduly nástroje NERUDA jsou znázorněny na obr. 7. Červeně jsou pak zvýrazněny oblasti, kterými se zabývá autor práce.



Obr. 7 Cíle dizertační práce v kontextu komplexních optimalizačních nástrojů

Jak je patrné, cíle práce jsou spjaty zejména se dvěma vzájemně souvisejícími oblastmi. Jednou z nich je zpřesňování ekonomických modelů ZEVO jakožto klíčových zařízení pro zpracování spalitelných odpadů. Díky podrobné analýze využitelnosti vyrobeného tepla je možné přesněji odhadnout akceptovatelnou cenu na bráně a v konečném důsledku tak i zpřesnit výpočet nástrojem NERUDA. K tomuto účelu byl vytvořen optimalizační matematický model synergie ZEVO s dalšími tepelnými zdroji, který je popsán v kap. 8. Částečně je zvýrazněna i oblast „T-E analýza ZEVO“ kam spadá implementace dílčích matematických modelů do T-E modelu ZEVO primárně vytvořeném v rámci práce [51]. Kromě toho se autor podílel i na zdokonalování tohoto modelu. Konkrétně se jednalo

⁵ V současné době (5/2020) je v souvislosti s připravovanou novelou zákona o odpadech diskutována varianta odkladu zákazu skládkování využitelných odpadů na rok 2030

např. o zpřesňování odhadu investičních a provozních nákladů popsané (viz kap. 5.5.1 a 5.5.2).

Druhou oblastí je potom vliv náhrady dálkového tepla z fosilních zdrojů teplem ze ZEVO na emise skleníkových plynů hodnocené měřítkem potenciálu globálního oteplování – „global warming potential“ (GWP), kterým se zabývá kap. 8.3. Jedná se o rozšíření optimalizačního modelu o další kritérium, kterým je vedle ekonomiky také minimalizace produkce skleníkových plynů.

V následujících kapitolách jsou blíže popsány jednotlivé body, které byly řešeny v rámci dizertační práce. V kap. 5 je popsána technologie ZEVO uvažovaná ve vytvořených T-E modelech. Ačkoliv má kapitola zejména rešeršní charakter, praktický přínos autora zde spočíval ve zdokonalení T-E modelu ZEVO s důrazem na analýzu investičních nákladů, jak je v kapitole blíže popsáno.

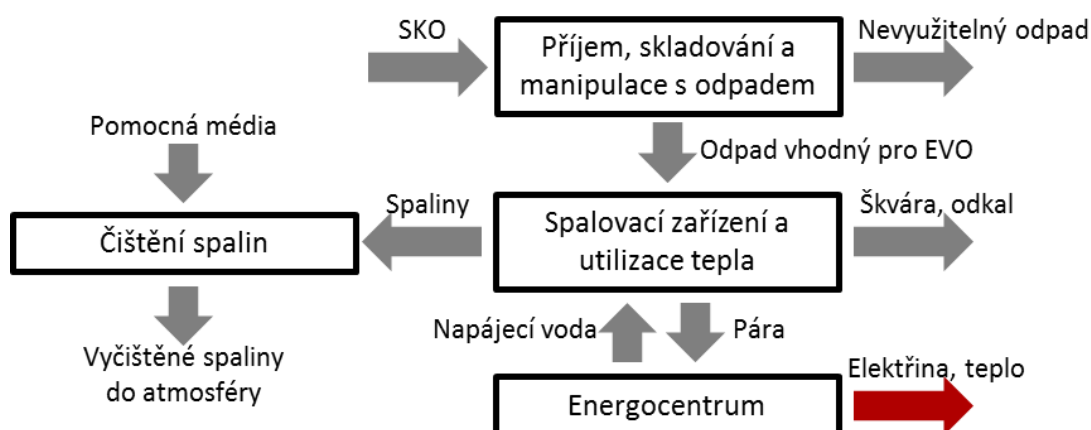
V kap. 6 je shrnuta provedená analýza sítí CZT na území ČR. Ta byla důležitá zejména pro praktickou využitelnost modelů v optimalizačním nástroji NERUDA, kde je nutné zohlednit místní podmínky ve všech lokalitách, kde se uvažuje s potenciální výstavbou ZEVO. Kap. 7 obsahuje výčet dílčích modelů, které byly následně využity v komplexním výpočtovém modelu synergie ZEVO s dalšími zdroji tepla popsaném v kap. 8, který představuje klíčovou část práce.

5 TECHNOLOGIE ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ ODPADŮ

V této kapitole jsou vysvětleny základní pojmy týkající se EVO a popsány obecné principy technologie ZEVO s ohledem na vyvedení a potenciální dodávku tepla. Znalost principů výroby energie a příslušných technologických limitů těchto zařízení jsou důležité pro pochopení významu řešené problematiky.

Pokud jde o EVO, v rámci dizertační práce jsou uvažovány pouze technologie využívající spalování neupraveného odpadu na roštu, tedy s přímou reakcí hořlaviny v odpadu za přebytku spalovacího vzduchu, tedy $\alpha > 1$, což je ve srovnání s pyrolýzou nebo zplyňováním jediná prověřená a spolehlivě fungující technologie pro termické využívání SKO. Zmíněné alternativy technologie EVO byly popsány v rámci dokumentu [52], který byl zpracován na pracovišti ÚPI ve spolupráci se společností Ernst & Young pro MŽP⁶. Hlavní energetické proudy a účinnost ZEVO v EU sumarizuje dokument [28].

Přestože se mezi jednotlivými projekty vyskytují určité odlišnosti, základní koncepce je v drtivé většině případů stejná. Celou technologii je možné rozdělit do několika technologických celků, viz obr. 8. Export energie, stěžejní pro problematiku řešenou v dizertační práci, je zvýrazněn.



Obr. 8 Schéma technologie EVO se zvýrazněným exportem vyrobené energie

5.1 PŘÍJEM, SKLADOVÁNÍ A MANIPULACE S ODPADEM

Spalitelné odpady, tedy zejména SKO jsou do areálu jednotky přiváženy pomocí nákladních nebo svozových automobilů. Na vrátnici je odpad zvážen a zkontrolován a následně je uložen do bunkru, což je betonová vodotěsná jímka. Skladovací prostory jsou navrženy tak, aby byly splněny technické požadavky na sklady odpadů, požadavky na ochranu zdraví lidí a životního prostředí a aby byla umožněna snadná a bezpečná

⁶ Příprava podkladů pro oblast podpory odpadového hospodářství 2014-2024

manipulace s odpadem. Kapacita bunkru odpovídá zásobě odpadu pro přibližně týdenní provoz zařízení.

Zejména ZEVO se zpracovatelskými linkami nižší kapacity musí být vybavena také drtičem odpadu. Ten umožňuje dávkování rozměrnějších kusů odpadu, případně OO do spalovacího zařízení a usnadňuje jeho homogenizaci. Do plnicí násypky spalovacího zařízení je odpad dávkován jeřábem s drapákem.

5.2 SPALOVACÍ ZAŘÍZENÍ A UTILIZACE TEPLA

Prakticky je možné se u EVO setkat se třemi základními typy spalovacího zařízení:

- rotační pec,
- fluidní lože,
- spalování na roštu.

Každý z uvedených druhů spalovacího zařízení má své výhody a nevýhody a je vhodný pro jiné využití a vlastnosti odpadu. I když z hlediska náplně dizertační práce nehraje konkrétní typ spalovacího zařízení zásadní roli, bude pro účely práce primárně uvažováno roštové spalování jakožto nejrozšířenější technologie pro energetické využití KO.

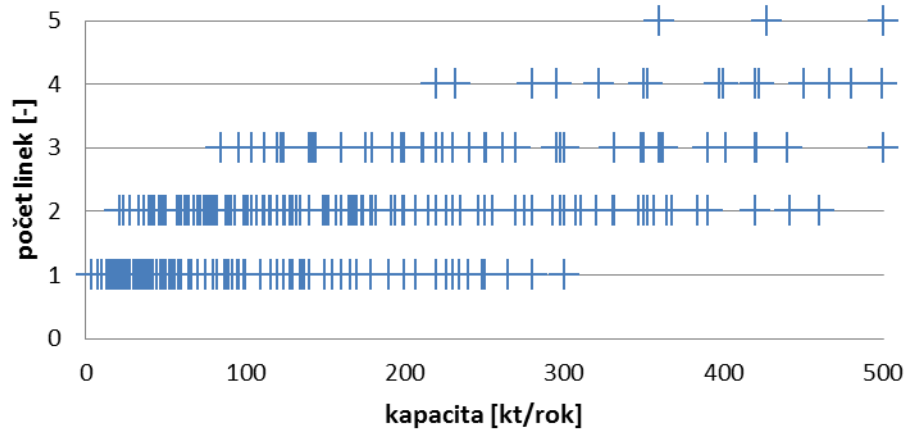
U tohoto typu beranový podavač vytlačuje odpad na horní část spalovacího roštu, na němž pak postupně dochází k dosušení odpadu, zapálení a vyhoření. Zbylá škvára potom ze spodní části pece putuje přes vodní nebo suchý uzávěr a pásový vynašeč k magnetickému separátoru železných kovů.

Vzduch je do spalovací komory přiváděn na několika místech (primární a sekundární). Dále je celé spalovací zařízení vybaveno několika hořáky, které slouží buď k najetí kotle, nebo k udržení minimální (legislativou dané) teploty, která je stanovena na 850°C za posledním přívodem spalovacího vzduchu, například v případě poklesu aktuální LHV odpadu. V závislosti na využívaném systému čištění spalin mohou být ve spalovací komoře například trysky pro nástřik močoviny, která zajišťuje selektivní nekatalytickou redukci (SNCR) oxidů dusíku (NO_x).

V kotli na odpadní teplo je vyráběna pára, která dále slouží k výrobě elektrické energie a tepla. Z hlediska účinnosti výroby elektřiny jsou důležitým faktorem parametry vyráběné páry. Obecně platí, že v jednotkách EVO jsou parametry páry výrazně nižší než v tepelných elektrárnách, typicky 400°C a 4 MPa. Důvodem je zejména obsah Cl ve spalovaných chlorovaných plastech a s tím související tvorba HCl. Při vyšší teplotě páry, a tedy i stěn trubek přehříváku by tak hrozil vznik vysokoteplotní chlorové koroze [53]. U jednotek EVO nižších kapacit (viz kap. 5.5) je v mnoha případech vyráběna pára s ještě nižšími parametry kvůli úspoře investičních nákladů. Vyrobená pára je využita pro výrobu energie (viz kap. 5.4), případně pro technologické účely.

Takovýto technologický celek lze označit za zpracovatelskou linku. Počet linek v jednotce EVO se liší zejména podle kapacity. Na obr. 9 jsou pro ilustraci uvedeny počty linek v závislosti na kapacitě ZEVO v EU [54]. Je patrné, že pro danou zpracovatelskou kapacitu existují zařízení s různými počty linek. Vzhledem k tomu, že každá linka má určitý pracovní rozsah daný výkonovým diagramem roštu, výhodou většího počtu linek je zejména větší flexibilita zařízení. Například v případě dočasného nedostatku odpadu je

možné jednu z linek odstavit a zbývající tak provozovat při optimálním výkonu, případně provádět nutnou údržbu nebo opravy bez nutnosti odstávky celého zařízení. Nevýhodou jsou potom vyšší měrné investiční náklady, což ovšem nemusí platit ve všech případech.



Obr. 9 Závislost počtu linek na kapacitě [54]

5.3 ČIŠTĚNÍ SPALIN

ZEVO bývají vybavena komplexními systémy čištění spalin s několika stupni, které bývají investičně nejnáročnější částí celé jednotky. Čištění spalin není předmětem dizertační práce, a proto je popsáno pouze velmi stručně. Systém čištění spalin je navržen tak, aby vyhověl požadavkům stanoveným v aktuálním evropském referenčním dokumentu o nejlepších dostupných technologiích (BREF) [55] vydávaném odbornými institucemi Evropské komise (viz tab. 2). V tabulce jsou pro srovnání uvedeny i platné emisní limity dle vyhlášky č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší, které vychází z evropské směrnice 2000/76/ES o spalování odpadů.

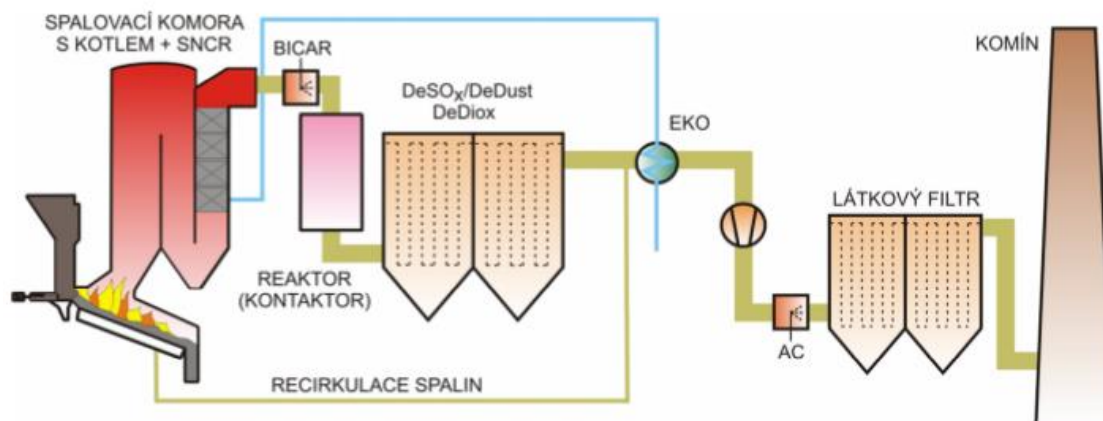
Tab. 2 Dosažitelné hodnoty emisí dle návrhu BREF 2017, srovnání s hodnotami dle platného BREF 2006 a platnými emisními limity

Polutant	BREF 2017 (návrh)	BREF 2006	Emisní limity
TZL*	2-5	1-5	10
HCl*	2-6	1-8	10
HF*	<1	<1	1
SO₂*	10-30	1-40	50
NO_x*	50-120	120-180	200
TOC*	3-10	1-10	10
CO*	10-50	5-30	50
Hg**	5-20	1-20	50
Cd a Tl*	0,01-0,02	0,005-0,05	0,05
Ostatní kovy*	0,05-0,3	0,005-0,5	0,5
Dioxiny a furany***	0,01-0,06	0,01-0,1	0,1
NH₃*	3-10	1-10	–
*mg/m _N ³	** μg/m _N ³	*** ng/m _N ³	

Kromě neškodných plynů jako je CO₂ nebo vodní pára obsahují spaliny ze spalování odpadu také škodlivé složky, jako jsou oxidy síry, oxidy dusíku, tuhé znečišťující látky (TZL), oxid uhelnatý, chlorovodík (HCl) a fluorovodík (HF), těžké kovy a další sloučeniny.

Obecně je možné rozdělit metody čištění spalin na metodu suchou, polosuchou, mokrou, případně jejich kombinace [56]. Z pohledu této práce, tedy z pohledu dodávky tepla z jednotek EVO, má systém čištění spalin vliv na energetickou náročnost procesu. Lze říci, že mokré metody čištění spalin spotřebují větší množství energie, a to jak elektrické (vyšší příkon ventilátorů), tak i tepelné (dohřev spalin před komínem kvůli zabránění kondenzaci). Systémy čištění spalin v ZEVO jsou popsány např. v [57], [58].

V technologii uvažované v práci se počítá s dvoustupňovým čištěním (viz schéma na obr. 10). Jako 1. stupeň čištění je řazena suchá sorpce s využitím NaHCO₃ následovaná tzv. 4D filrací. Do spalinovodu je ze zásobníku dávkován práškový NaHCO₃. Aby bylo zaručeno dokonalé rozptýlení sorbentu a dostatečná zdržná doba pro průběh reakcí, je za místem dávkování řazen reaktor suché sorpce. Za ním je umístěn další aparát prvního stupně čištění spalin, ve kterém probíhá tzv. 4D filtrace. Jde o technologii s názvem Cerafil® TopKat vyvinutou firmou Clear-Edge. Odseparované prachové částice, které jsou zachycovány na filtračních elementech, tvoří na povrchu materiálu filtrační koláč. Ten je periodicky odstraňován při regeneraci filtru tlakovým vzduchem.



Obr. 10 Aparátová skladba souboru čištění spalin

Do druhého stupně čištění vstupují spalinový ventilátor. Do nich je injektován jemně namletý práškový sorbent v podobě směsi aktivního uhlí a zeolitu. Cílem je adsorpce těžkých kovů a perzistentních organických látek, polyaromatických sloučenin, dioxinů a furanů na povrch aktivního uhlí. Primárním účelem zeolitu je kromě adsorpce také ochrana rukávcového filtru před vykondenzovanou vlhkostí. Tento filtr slouží k odstranění částic sorbentu.

5.4 ENERGOCENTRUM

Energocentrem je myšlen soubor aparátů využívajících vyrobenou páru, tedy parní okruh. Pokud jednotka slouží i k výrobě elektřiny a nefunguje pouze jako zdroj tepelné energie (výtopna), bývá využita buď PT nebo KOT.

Celoroční provoz ZEVO v čisté kondenzačním režimu není v klimatických podmínkách typických pro ČR obvyklý. To je dáno jak ekonomicky, tak i legislativně. Důvodem je nízká dosažitelná účinnost výroby elektřiny z důvodu nižších používaných parametrů páry kvůli riziku vysokoteplotní koroze trubek přehříváku kotle.

Aby bylo spalování odpadu možné považovat za energetické využití, a tedy aby bylo vůbec možné projekt EVO zrealizovat, je nutné podle směrnice evropského parlamentu a rady 2008/98/ES [2] splnit podmínku minimální energetické účinnosti (viz kap. 1.1).

Za určitých podmínek (dostatečně vysoké parametry vyráběné páry a vysoká účinnost turbíny) je podmínku účinnosti R1 možné splnit i bez dodávky tepla. Pokud však existuje možnost napojení jednotky EVO do sítě CZT, je tato varianta ekonomicky výhodnější. Určitou výjimkou mohou být ZEVO s nízkou kapacitou, kde přichází v úvahu například varianta pouze s horkovodním kotlem.

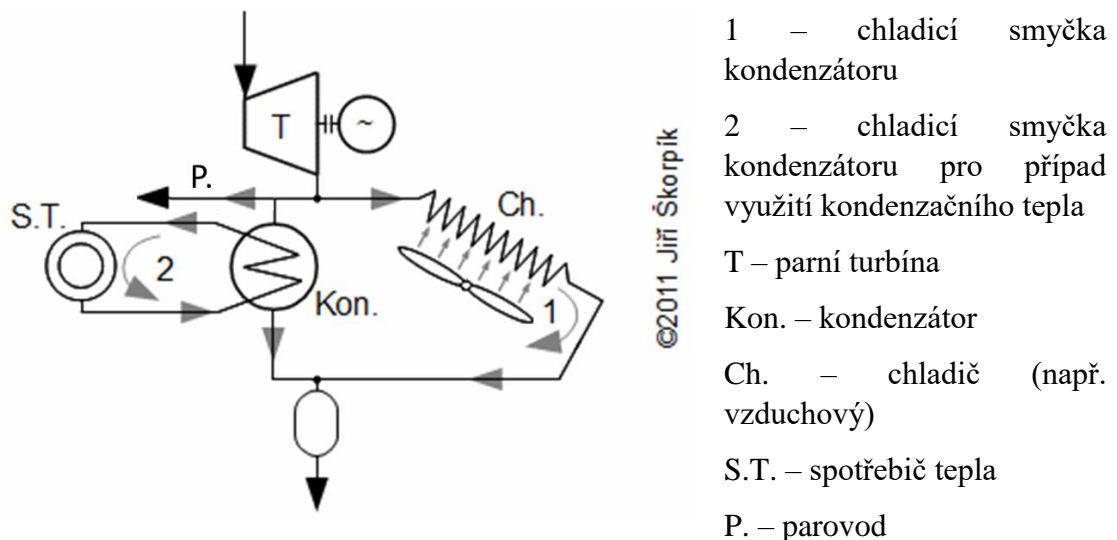
V případě, že je využíváno kombinované výroby elektřiny a tepla (KVET), existují u EVO dvě nejčastější řešení: PT nebo KOT.

5.4.1 Protitlaká turbína

Z PT vystupuje emisní pára o vyšším než atmosférickém tlaku a teplotě nad 100°C. Ta potom slouží buď k ohřevu horké vody, nebo je přímo využívána.

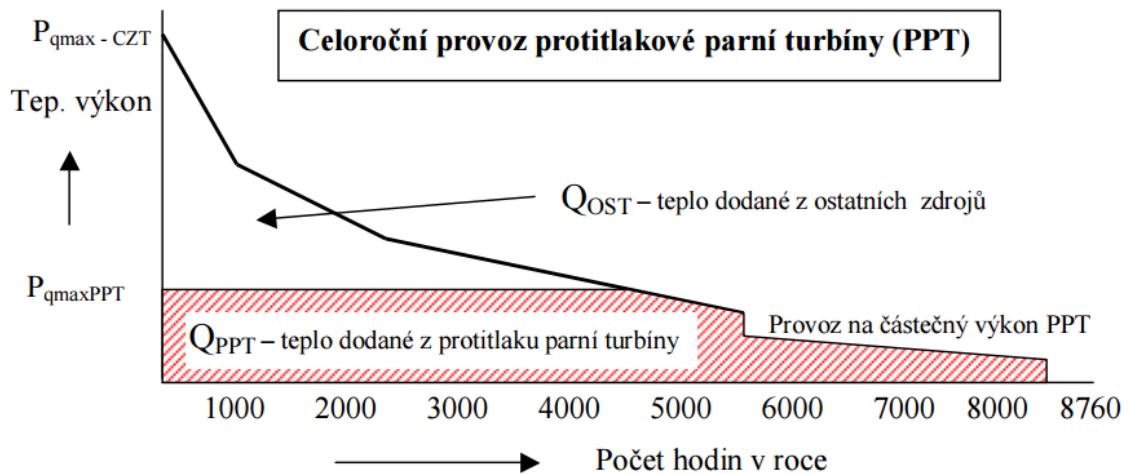
Na rozdíl od tepláren nebo výtopen, kde je tepelný výkon (dávkování paliva) přizpůsobován poptávce po teple, je v zařízeních EVO uvažováno s relativně konstantním příkonem v palivu – odpadu. To je dáno ekonomikou – poplatkem za příjem odpadu a zároveň uzavřenými kontrakty na zpracování odpadu. Snížení aktuální zpracovatelské kapacity jenom kvůli poklesu poptávky po teple tak nepřichází v úvahu. PT má tak u EVO smysl v případech, kdy je vyžadován víceméně konstantní tepelný výkon v průběhu celého roku. Prakticky je tomu tak v situacích, kdy je poptávka po teple v síti CZT výrazně vyšší než tepelný výkon jednotky EVO a ani v letních měsících nedochází k významnějšímu maření tepla.

Za zvláštní případ PT lze označit točivou redukci, což je v podstatě PT s nízkou vnitřní termodynamickou účinností a nižšími investičními náklady, která slouží primárně pro redukci páry a až sekundárně pro výrobu elektřiny – například pouze pro technologické účely. Způsob zapojení PT je znázorněn na obr. 11.



Obr. 11 Zapojení protitlaké turbíny, upraveno na základě [59]

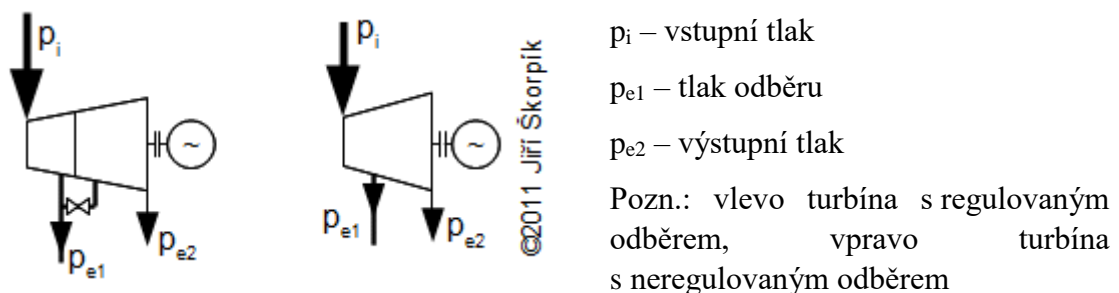
Na obr. 12 je na příkladu ilustrováno, jakým způsobem je v průběhu roku realizována dodávka tepla do sítě CZT v případě využití PT na tzv. diagramu trvání potřeby tepla. Je zřejmé, že výkon daného tepelného zdroje v tomto případě postačuje na pokrytí poptávky po teple pouze během teplejší části roku. Obrázek ovšem odpovídá spíše dodávce tepla z teplárny, kde je dodávka tepla hlavním předmětem činnosti a na rozdíl od ZEVO je dávkování paliva ovlivněno poptávkou po teple. V jednotkách EVO je tím pádem využití PT vhodné pouze v případech, kdy je i v teplejším období možné zařízení provozovat s maximálním nebo téměř maximálním tepelným výkonem, tedy buď (ve srovnání s tepelným výkonem ZEVO) ve velkých sítích CZT nebo například v průmyslových parních sítích. V opačném případě by docházelo ke zbytečnému maření tepla, protože dávkování odpadu a tedy i výkon jednotky EVO je nutné udržovat po celý rok na víceméně konstantní úrovni. Primárním účelem je zpracování odpadu a tedy naplnění projektované kapacity.



Obr. 12 Příklad provozu protitlaké turbíny [60]

5.4.2 Kondenzační odběrová turbína

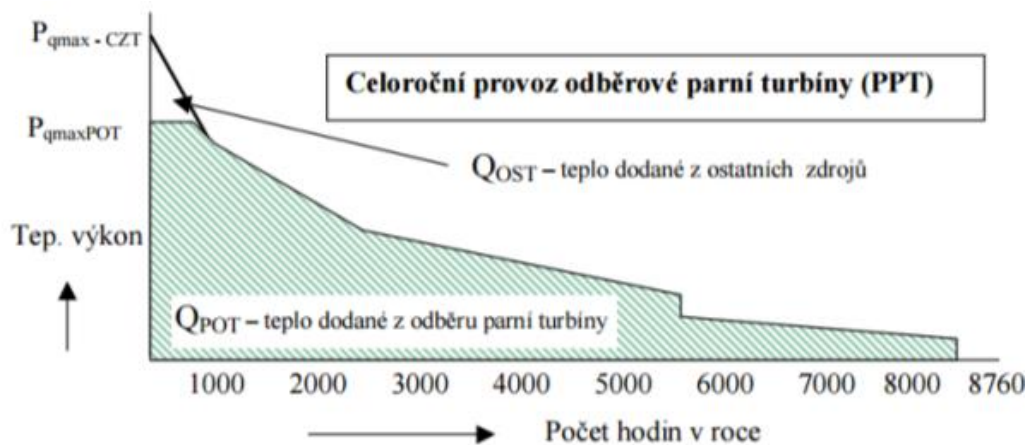
V KOT je mezi protitlakou a kondenzační částí turbíny realizován jeden nebo více odběrů na různých tlakových úrovních podle aktuální potřeby. KOT je využívána zejména v lokalitách, kde není možné celoročně uplatnit veškeré vyrobené teplo a v letních měsících (nebo obecně v čase snížené poptávky po teple) se zvyšuje výroba elektřiny na úkor tepla tak, aby nebylo nutné přebytečnou energii mařit. Odběr páry může být regulovaný nebo neregulovaný (viz obr. 13). Regulovaný odběr je využíván například u zásobování parovodu parou o vyšším tlaku, než je na konci turbíny. Množství páry je regulováno ventilem, který je vně nebo je součástí turbíny. Neregulované odběry se používají zejména u elektrárenských turbín za účelem tzv. regenerace tepla [59].



Obr. 13 Zapojení kondenzační odběrové turbíny [59]

I v období vysoké poptávky po teple je u KOT nutné zachovat určitý minimální průtok páry kondenzační částí turbíny. V opačném případě hrozí vznik kavitace v této části a poškození turbíny [61]. Důležitým parametrem KOT je maximální rozsah dodávky tepla, který je ovlivněn právě tímto minimálním průtokem.

Na obr. 14 je opět příklad dodávky tepla ze ZEVO s KOT. Na rozdíl od PT (obr. 12) je zde poptávka pokryta po větší část roku.



Obr. 14 Příklad provozu kondenzační odběrové turbíny [60]

Další variantou KOT může být turbína s odpojitelným kondenzačním stupněm, kde není nutné zachování zmíněného minimálního průtoku a je tedy možné disponovat vyšším tepelným výkonem.

V předchozích kapitolách byly shrnuty informace o CZT a technologii EVO se zaměřením na problematiku dodávky tepla. Získané poznatky byly dále využity při řešení dizertační práce. Cílem bylo vytvoření souboru komplexních modelů popisujících dodávku tepla do sítě CZT z jednotky EVO a koexistenci s dalšími zdroji tepla v rámci jedné sítě CZT.

Pro maximalizaci využití vyrobeného tepla je navrženo využití akumulční nádrže. Akumulační nádrž je koncipována jako tlaková nádrž, která slouží k akumulaci vyrobeného tepla ve formě horké vody. Nádrž je umístěna ve venkovním prostředí v těsné blízkosti ZEVO. Funkcí akumulace tepla je vyrovnávání spotřebních výkonových výkyvů v distribuční síti CZT a dodávek tepla ze ZEVO. Součástí nádrže je také nezbytné příslušenství vč. expanzního automatu a čerpadla. Akumulace tepla je řešena v kap. 7.3.

5.5 EKONOMIKA ZEVO

Ekonomický přínos projektu může být hodnocen několika různými kritérii. Nejčastěji se jedná o dobu návratnosti (PP), návratnost investic (ROI), čistou současnou hodnotu (NPV) a IRR. Např. [62] využívá tato kritéria k objektivnímu posouzení ekonomické udržitelnosti projektu ZEVO v Číně. Kritéria PP a ROI mají velmi jednoduchý výpočet, ale tyto ukazatele neberou v úvahu peněžní toky v jednotlivých letech (pouze zisk projektu). PP a ROI často nezahrnují princip změny hodnoty peněz v čase. Ve většině případů se autoři zaměřují na využití IRR nebo NPV [63]. K určení rizika investic se kombinuje binomická stromová analýza a modifikovaná verze NPV. Publikace [64] používá nový termín “faktor dostupnosti odpadu” a kritérium IRR pro výpočet rizika nových projektů ZEVO v České republice. Rozdíl mezi NPV a IRR je podrobněji popsán v [65].

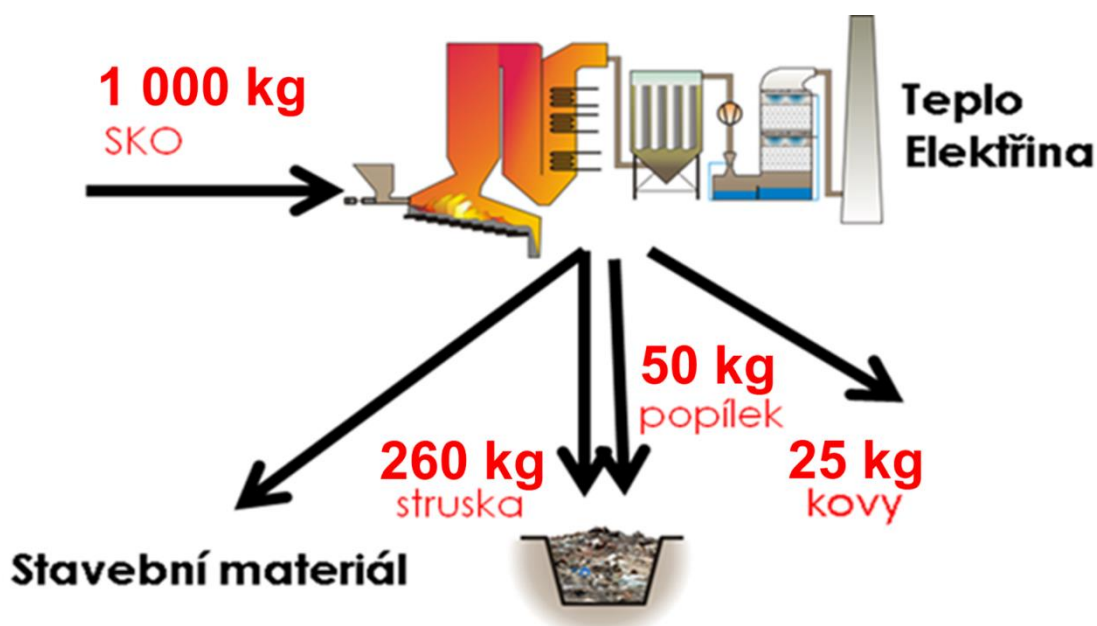
Při plánování projektu EVO a vyhodnocení jeho ekonomiky hraje kromě obecně platných pravidel důležitou roli několik hlavních faktorů závislých na konkrétní posuzované lokalitě. Mezi ně patří zejména vlastnosti spalovaného odpadu, odbyt a cena vyrobeného

tepla a možnosti synergie, tedy potenciální investiční nebo provozní úspory např. vlivem sdílení stavebních objektů nebo zaměstnanců dalšího tepelného zdroje. V rámci práce byly tyto faktory vyhodnoceny a použity jako vstupy do T-E modelů, jejichž hlavním výstupem bylo určení minimální ceny za zpracování odpadu nutné pro zajištění stanovené výnosnosti projektu. V této kapitole jsou shrnuty obecné principy platné pro zajištění ekonomické udržitelnosti projektu EVO. V potenciální lokalitě pro výstavbu jednotky EVO jsou z pohledu udržitelnosti zásadní následující parametry:

1. **Poptávka po vyrobeném teple:** Obecně lze konstatovat, že ZEVO jsou ekonomicky vysoce závislá na uplatnění vyrobeného tepla. Nízkou poptávku je do jisté míry možné kompenzovat výnosy z výroby elektřiny, nicméně zejména kvůli chemickému složení SKO, konkrétně obsahu chloru, není prakticky možné dosáhnout parametrů páry běžně dosahovaných v tepelných elektrárnách (a tedy i produkce elektřiny). Bez dostatečného využití vyrobeného tepla může mít ZEVO v závislosti na použité turbíně problém dosáhnout požadované účinnosti R1 (viz kap. 1.1), ale zejména **je nutné kompenzovat nižší výnosy z prodeje tepla zvýšením poplatku za zpracování odpadu**, čímž se projekt může stát ekonomicky neakceptovatelným.
2. **Možnosti synergie:** Synergií jsou myšleny potenciální investiční nebo provozní úspory např. vlivem sdílení stavebních objektů nebo zaměstnanců dalšího tepelného zdroje.
3. **Dostupnost odpadu:** Dalším z důležitých lokálních faktorů, na kterém závisí udržitelnost projektu, je dostupnost odpadu za přijatelnou cenu. Lze předpokládat, že zajištění dostatečného množství odpadu je možné vždy bez ohledu na zpracovatelskou kapacitu. Při vyšší kapacitě je ale nutné stanovit takovou cenu na bráně, při které se producentům odpadu vyplatí zvolit si toto zařízení i za cenu vyšších nákladů za přepravu.

V rámci dizertační práce je rozlišováno mezi dvěma hlavními technologickými koncepty, a to s jednotkami EVO malých kapacit (cca do 50 kt/rok) a jednotkami středních a vyšších kapacit (cca nad 80 kt/rok). Tento přístup byl poprvé představen v práci [66]. Přesto, že u jednotek malých kapacit lze zpravidla očekávat vyšší měrné provozní náklady (např. mzdové náklady), měrné investiční náklady mohou být relativně nízké. To je podrobněji popsáno v kap. 5.5.1 a 5.5.2. Potenciál využití malých ZEVO spočívá zejména v možnostech realizace v lokalitách s nižší poptávkou po teple, s nižší produkcí odpadu v blízkém okolí nebo kdekoliv, kde by výstavba velkého ZEVO z různých důvodů nebyla možná. Velkou výhodou těchto jednotek je možnost využití integrovaných zařízení a sériově vyráběných technologických prvků. Potenciál využití malých jednotek EVO byl popsán v práci [67].

Technologické provedení jednotek EVO obecně odpovídá jiným spalovacím procesům. Vyšší nároky jsou kladeny na vedení spalovacího procesu v peci a na zajištění čistoty především plyných produktů procesu – spalín. Výstupy procesu ve vztahu ke vstupnímu toku SKO znázorňuje obr. 15.



Obr. 15 Příklad – schéma možných materiálových toků a energetických produktů vystupujících z provozu EVO

V evropských podmínkách je obvyklá realizace a provoz ZEVO ve velmi širokém rozpětí zpracovatelských kapacit (viz obr. 9). Zařízení s nízkou až střední kapacitou se, na rozdíl od jednotek s vyšší kapacitou, obvykle orientují na výrobu tepla na úkor elektřiny. Systém čištění spalin je koncipován obdobně jako u standardního velkého ZEVO. Investičně výhodné je především řešení založené na tzv. suchém čištění spalin, spočívajícím v rozprašování sorbentů a adsorbentů do spalin a jejich následné filtraci. Jak je zmíněno výše, potenciál malého ZEVO spočívá ve využití sériově vyráběných nebo integrovaných aparátů a celkově jednodušších (ale plně funkčních) řešení. Tím mohou měrné investiční náklady klesnout a v konečném důsledku je tedy v některých případech možné u těchto zařízení dosáhnout nižších nákladů na zpracování odpadu [66].

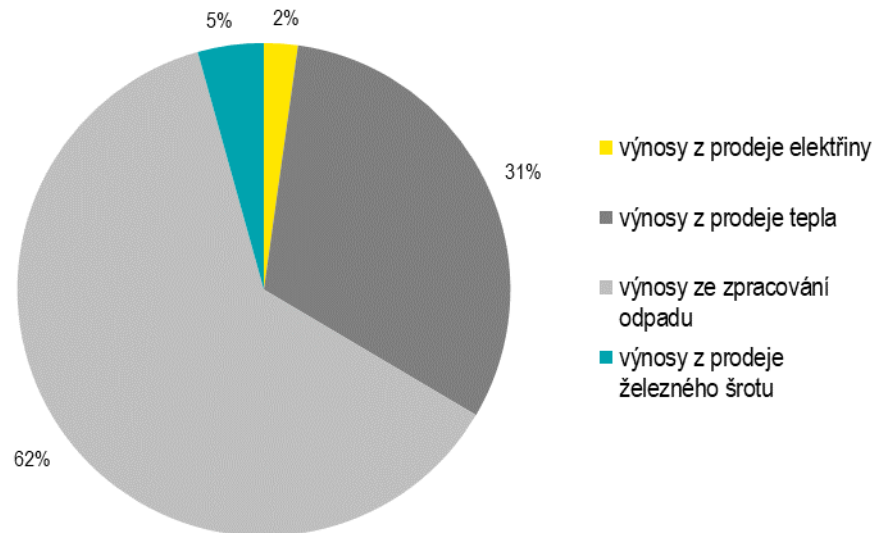
5.5.1 Provozní náklady a výnosy

Na obr. 16 a obr. 17 je uveden příklad nákladů a výnosů ZEVO s kapacitou 50 kt/rok a méně. Je zřejmé, že nejdůležitější položkou výnosů u malého ZEVO je vedle výnosů za zpracování odpadů také příjem z prodaného tepla. Udržitelnost takového projektu je tedy silně závislá na schopnosti místní sítě CZT absorbovat teplo vyrobené v ZEVO a na akceptovatelné ceně tepla na rozhraní dodávky jednotka EVO-teplárna. Co se týče nákladů, největší roli hrají mzdové náklady a zpracování reziduí. V případech, kdy je EVO realizováno v rámci existujícího teplárenského provozu, lze dosáhnout značných úspor provozních nákladů při sdílení zaměstnanců teplárny. To platí i o případném využití některých existujících technologií, což vede k úspoře investičních nákladů (tzv. synergický efekt).

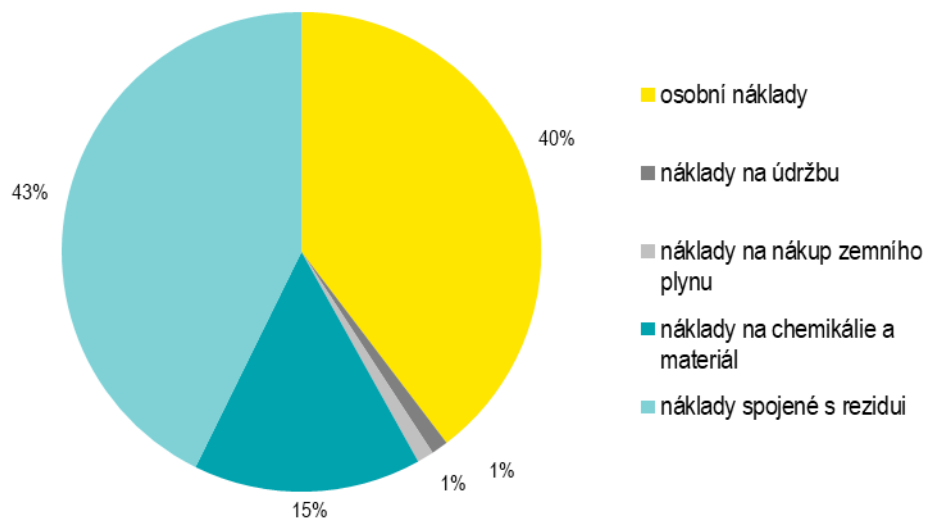
Na úrovni roku 2024 je uvažováno s cenou skládkování reziduí ve výši 500 Kč/t pro nevyužitelné odpady (škvára) a 4000 Kč/t pro nebezpečné odpady (popílek). Odhady jsou založeny na aktuálních cenách v roce 2017. Při uvažované produkci 0,25 t škvára a 0,03 t popílku na tunu spáleného odpadu a při nulovém skládkovacím poplatku tedy činí náklady na zpracování reziduí asi 245 Kč/t vstupního odpadu. Za předpokladu, že zvýšení

nákladů za zpracování reziduí je plně kompenzováno zvýšením ceny na bráně, navýšení skládkovacího poplatku za skládkování nevyužitelných odpadů o 500 Kč/t povede k nárůstu ceny na bráně o 125 Kč/t.

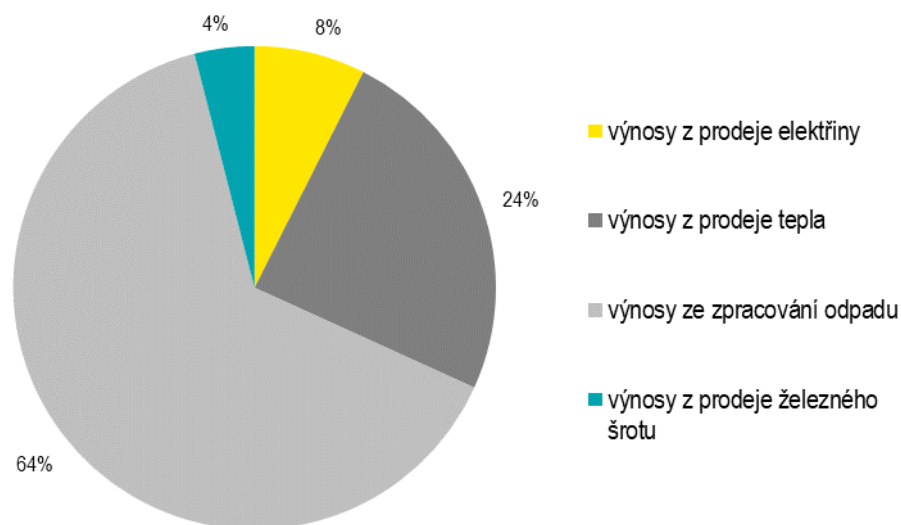
Výnosy z prodeje elektřiny jsou minimální, zejména u malého ZEVO. Primárně je vyráběna elektřina pro účely krytí vlastní spotřeby. U velkého ZEVO (viz obr. 18 a obr. 19) zaujímá prodej elektřiny o něco výraznější podíl. V případě porovnání nákladů malého a velkého EVO je značný rozdíl ve mzdových nákladech.



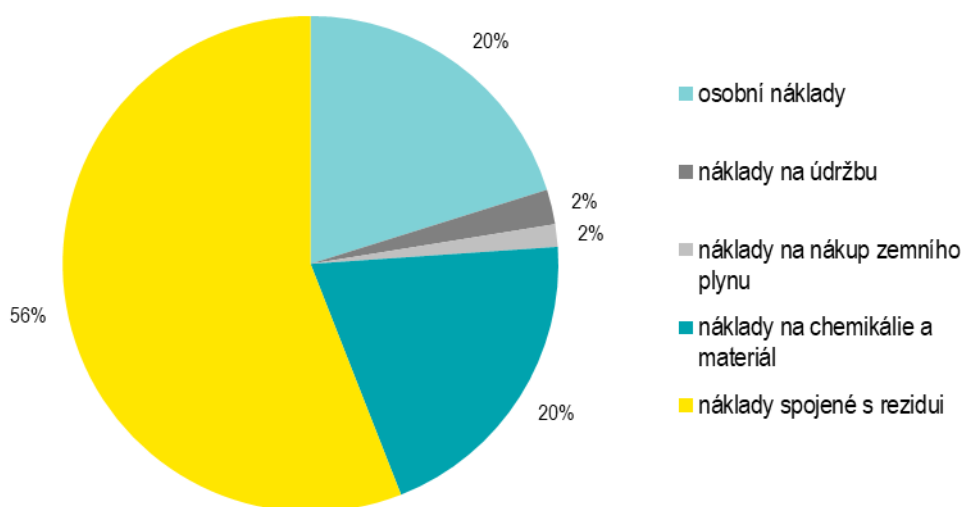
Obr. 16 Příklad výnosového koláče pro malé EVO (předpoklady: kapacita EVO 20 kt/rok, cena tepla 200 Kč/GJ, cena SKO na bráně 2 300 Kč/t, uplatněno 70 % vyrobeného tepla)



Obr. 17 Příklad nákladového koláče pro malé EVO (předpoklady: kapacita EVO 20 kt/rok, cena tepla 200 Kč/GJ, cena SKO na bráně 2 300 Kč/t, uplatněno 70 % vyrobeného tepla)



Obr. 18 Příklad výnosového koláče pro velké EVO (předpoklady: kapacita EVO 200 kt/rok, cena tepla 200 Kč/GJ, cena SKO na bráně 2 300 Kč/t, uplatněno 70 % vyrobeného tepla)

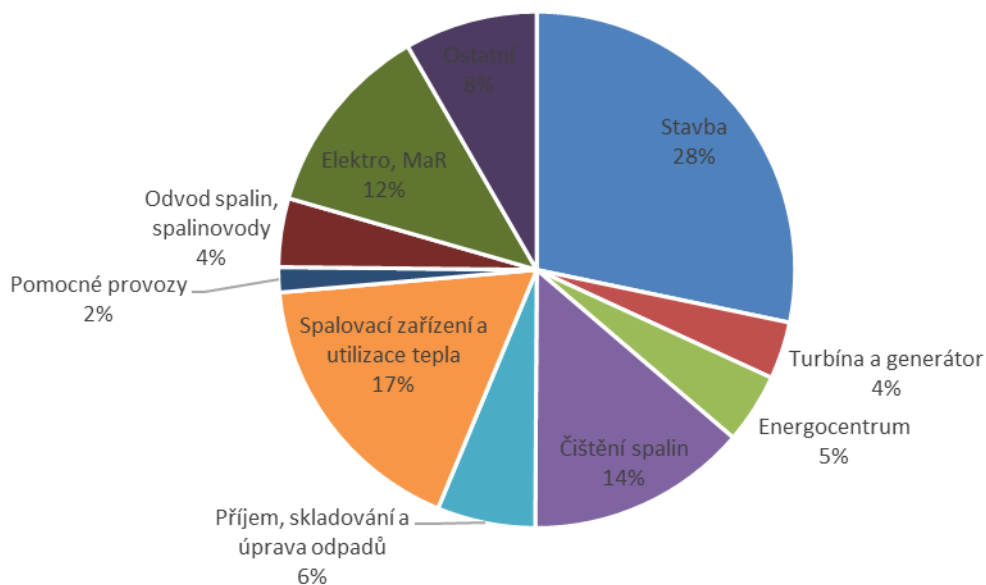


Obr. 19 Příklad nákladového koláče pro velké EVO (předpoklady: kapacita EVO 200 kt/rok, cena tepla 200 Kč/GJ, cena SKO na bráně 2 300 Kč/t, uplatněno 70 % vyrobeného tepla)

Z obr. 16 a obr. 18 mimo jiné vyplývá, že zvýšení nákladů nebo požadavku na výnosnost projektu, anebo naopak snížení výnosů z prodeje tepla musí být kompenzováno vyšší cenou na bráně, na které závisí dostupnost odpadů. Pokud je minimální cena na bráně příliš vysoká, z pohledu investora mohou vzniknout problémy s naplněním kapacity za tuto cenu a pro producenty zase příliš vzrostou náklady za zpracování a může se tedy rozhodnout pro zpracování odpadu v jiném konkurenčním zařízení.

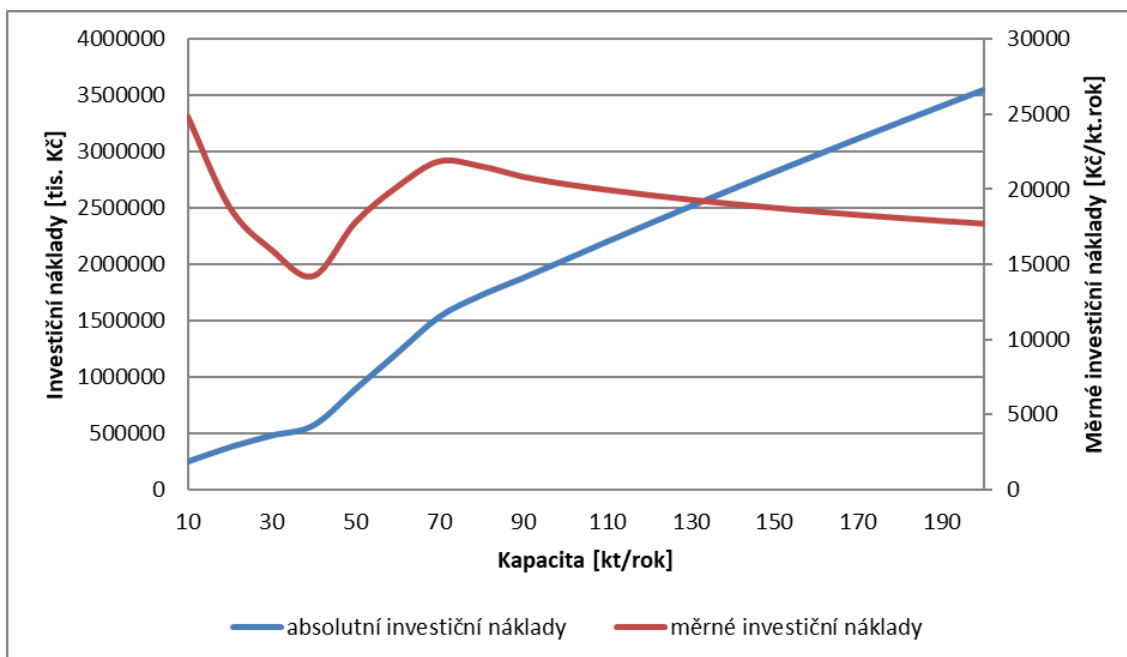
5.5.2 Investiční náklady

Při stanovení investičních nákladů technologie EVO bylo postupováno následujícím způsobem: každý z technologických souborů jednotky EVO se skládá z několika dalších zařízení. Pro každé z těchto zařízení byla ve spolupráci s odborníky ze společnosti EVECO Brno, s.r.o. definována mocinná funkce růstu investičních nákladů s kapacitou. Na stejném principu byly odhadnuty koeficienty pro všechny uvažované technologické a stavební celky. Graf na obr. 20 ukazuje přibližné složení investičních nákladů stavební a strojní části technologie ZEVO. Je nutné zmínit, že podíly jednotlivých provozních souborů se částečně liší v závislosti na kapacitě a konkrétním provedení (parametry vyráběné páry, typ turbíny apod.) Také je možné v některých případech využít např. existující stavební objekty nebo některé strojní součásti (chladicí okruh, pomocné provozy apod.) – tzv. synergický efekt – a tím dosáhnout úspory investičních nákladů a v důsledku i nižší požadované ceny na bráně.



Obr. 20 Složení investičních nákladů stavební a strojní části technologie ZEVO

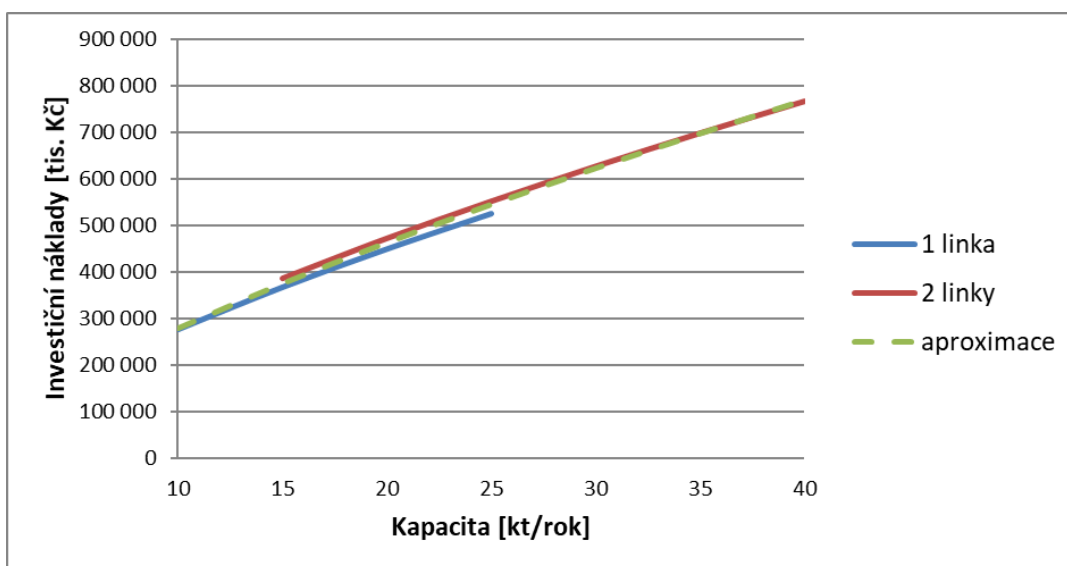
Pro každý z provozních souborů byly pro danou kapacitu zařízení stanoveny investiční náklady. Jejich součet pak ukazuje obr. 21. Dobře patrný je pokles investičních nákladů zmíněný v kapitole výše. Jelikož odhad investic pro kapacity do 40 kt/rok vychází z odborných odhadů a pro kapacity nad 80 kt převážně z již realizovaných projektů, investice v intervalu 40-80 kt/rok byly stanoveny aproximací.



Obr. 21 Závislost měrných a absolutních investičních nákladů zařízení EVO na kapacitě [68]

Obr. 22 ukazuje rozdíl investičních nákladů technologie v rozsahu kapacit 10-40 kt/rok pro variantu s jednou a dvěma zpracovatelskými linkami. V závislosti na konkrétním technologickém řešení jsou u technologií EVO nízkých kapacit investiční náklady u dvou linek přibližně o 5 % vyšší. Výhodou tohoto řešení je vyšší flexibilita zařízení, to znamená možnost odstavení pouze jedné z linek, nebo naopak zachování alespoň částečného zpracovatelského a tepelného výkonu při poruše jedné z linek.

Jak je z obrázku patrné, rozdíl mezi jednou a dvěma linkami není z pohledu investičních nákladů pro účely bilančního výpočtu příliš významný. Z důvodu zjednodušení modelu bylo přistoupeno k aproximaci mocninnou funkcí. Tímto způsobem byly stanoveny křivky závislosti investičních nákladů na kapacitě pro všechny hodnocené varianty.



Obr. 22 Investiční náklady technologie EVO v jedno a dvojlínkovém provedení

5.5.3 Personální obsazení

Vzhledem k povaze provozu ZEVO je nezbytné obvykle koncipovat její provoz jako nepřetržitý čtyřsměnný s ročním pracovním fondem 8 000 hodin, počítaje přibližně se dvěma odstávkami pro provedení nezbytných oprav a plánované údržby. Počet osob odpovídá obsazení nepřetržitého provozu během pracovních dní a víkendů. Dále je doplněna jedna kompletní směna, která umožňuje zastoupení v případě nemoci nebo dovolené.

Tab. 3 vytvořená ve spolupráci s odborníky z firmy EVECO Brno, s.r.o. ukazuje příklad předpokládaného personálního obsazení ZEVO s kapacitou 40 kt/rok. V součtu je uvažováno s celkem 19 plnými úvazky. Uvedené platové ohodnocení platí pro současnou platovou úroveň, přičemž je očekáván růst mezd o 3,5 %/rok. Celkové náklady na zaměstnance jsou pro první rok provozu (2025) včetně zdravotního a sociálního pojištění uvažovány ve výši asi 15,1 mil. Kč.

Tab. 3 Personální obsazení navržené varianty, na základě [66]

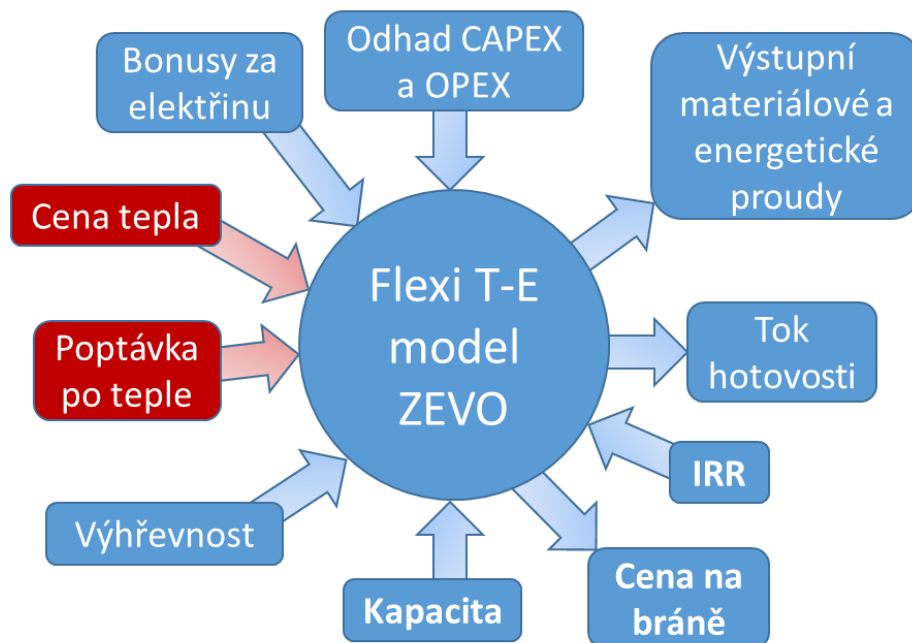
Pracovní pozice	FTE	Úvazek (týden)	Platové ohodnocení SHM/měsíc [Kč]	Osobní náklady rok / osoba [Kč]
Denní zaměstnanci				
Specialista (zodpovědný za ekologii a odpady)	1	0,5	51 000	306 000
Vedoucí pracovník	1	0,5	51 000	306 000
Hlavní operátor	1	1	41 000	492 000
Servisní technik	1	0,3	37 000	133 200
Úklid	1	0,1	22 400	26 880
1. směna				
Operátor – jeřábník	1	1	35 400	424 800
Operátor	1	1	37 500	450 000
Operátor - záskok	1	1	32 400	388 800
Obsluha - váha	1	1	30 000	360 000
Údržba (strojné + elektro)	1	1	37 000	444 000
2. směna				
Operátor – jeřábník	1	1	35 400	424 800
Operátor	1	1	37 500	450 000
Operátor - záskok	1	1	32 400	388 800

Obsluha - váha	1	0,5	30 000	180 000
Údržba (strojné + elektro)	1	1	37 000	444 000
3. směna				
Operátor – jeřábík	1	1	35 400	424 800
Operátor	1	1	37 500	450 000
Operátor - záskok	1	1	32 400	388 800
4. směna				
Operátor – jeřábík	1	1	35 400	424 800
Operátor	1	1	37 500	450 000
Údržba (strojné + elektro)	1	1	37 000	444 000
Operátor - záskok	1	1	32 400	388 800
CELKEM:				8 190 480

5.5.4 Náklady na zpracování odpadu

Investiční a provozní náklady uvedené v kap. 5 slouží jako vstupní data do simulačního T-E modelu „Flexi“ podrobně popsáném v práci [51]. Jak ukazuje obr. 23, tento model slouží především k orientačnímu výpočtu minimální ceny za zpracování odpadu. Využívá se zde tedy tzv. zpětného výpočtu (backsolvingu), kdy je prostřednictvím požadované výnosnosti projektu dopočten parametr, který běžně ve výpočtech figuruje jako jeden ze vstupů. Některé ze vstupních parametrů jsou buď relativně snadno odhadnutelné, nebo jsou předmětem jiných závěrečných prací řešených na pracovišti ÚPI. Červeně jsou zvýrazněny vstupy řešené v rámci této práce, tedy uplatnění vyrobeného tepla a jeho přijatelná cena. Jak plyne z obr. 16 a obr. 18, jedná se z hlediska ekonomiky o velmi důležité parametry pro odhad ekonomické udržitelnosti projektu EVO. Jejich význam je více vysvětlen v kap. 4.

Vypočtená cena na bráně z Flexi modelu, respektive její závislost na kapacitě v jednotlivých lokalitách je následně využita v optimalizačním nástroji NERUDA [47]. Jedná se o logistickou transportní svozovou úlohu, která je také popsána v následující kapitole.



Obr. 23 Shrnutí vstupů a výstupů T-E modelu “Flexi”
Pozn.: CAPEX – investiční náklady, OPEX – provozní náklady. Červeně jsou vyznačeny parametry klíčové z hlediska řešené problematiky.

6 SÍTĚ CZT NA ÚZEMÍ ČR

V této kapitole je popsána metodika, na základě které byly identifikovány lokality se sítěmi CZT, které má význam uvažovat z hlediska potenciální výstavby ZEVO. Byly shromážděny základní informace o všech těchto sítích na území ČR, z nichž vybrané byly detailně analyzovány.

6.1 ANALÝZA

V roce 2016 bylo v ČR prodáno asi 105 000 TJ dálkového tepla. Z toho zaujímají dominantní místo dodávky do domácností (50 %) a dále pak do průmyslu (29 %) [69]. Současná infrastruktura zahrnuje přes 2000 provozoven s licenci k výrobě tepla [70].

Otázkou zůstává, jakým způsobem v budoucnu uspokojit tyto energetické nároky vzhledem k tomu, že v drtivé většině případů jsou pokryty fosilními palivy, z velké části uhlím (59 %) [69]. V souvislosti s plánovaným útlumem těžby v budoucnu hrozí jeho nedostatek nebo vyšší environmentální zpoplatnění. Současně provozované uhelné zdroje dodávající teplo pro CZT jsou navíc často předimenzované, jak bylo uvedeno výše. Řešením této situace může být substituce energeticky efektivnějšími zdroji na bázi oblastních zdrojů využívajících KVET, například právě EVO.

V rámci území ČR shromažďuje data o cenách a dodávkách tepla Energetický regulační úřad (ERÚ) na základě informací od držitelů licencí na výrobu nebo rozvod tepelné energie v jednotlivých lokalitách. V roce 2017 zde bylo evidováno celkem 3125 cenových lokalit.

ZEVO mohou být projektována v širokém rozsahu kapacit. V této práci je primárně uvažováno s jednotkami se zpracovatelskou kapacitou cca od 10 kt/rok, nicméně v praxi jsou využívána i zařízení s výrazně nižší kapacitou, která však většinou primárně neslouží pro zpracování neupraveného SKO [71].

Potenciální dodávka tepla závisí například na LHV přijímaného odpadu nebo na použité technologii. Řádově jsou tato zařízení při maximálním tepelném výkonu cca 2,5 MW_t schopna dodat asi 70 TJ tepla za rok. Vzhledem ke klimatickým podmínkám ČR je ovšem průběh dodávky tepla v průběhu roku výrazně nerovnoměrný a pro zajištění dostatečného odbytu tepla mimo zimní měsíce je nutné uvažovat sítě CZT s vyšší spotřebou tepla. Kromě ekonomické udržitelnosti je to důležité také pro dosažení minimální účinnosti R1, jejíž hodnota musí být minimálně 0,65 pro nová zařízení, aby mohla být tato zařízení klasifikována jako EVO [2], viz kap. 1.1. Na základě zkušeností je zřejmé, že ke splnění těchto podmínek je nutné uvažovat sítě CZT s minimální roční dodávkou tepla alespoň 100 TJ.

6.2 CÍLE

Pro komplexní posouzení potenciálu výstavby ZEVO s využitím nástroje NERUDA tak bylo nutné zmapovat sítě CZT na území ČR, a to zejména z hlediska celkové roční poptávky po teple, jejího rozložení v průběhu roku, dále pak zohlednit současné zdroje tepla, využívaná paliva a teplonosná média.

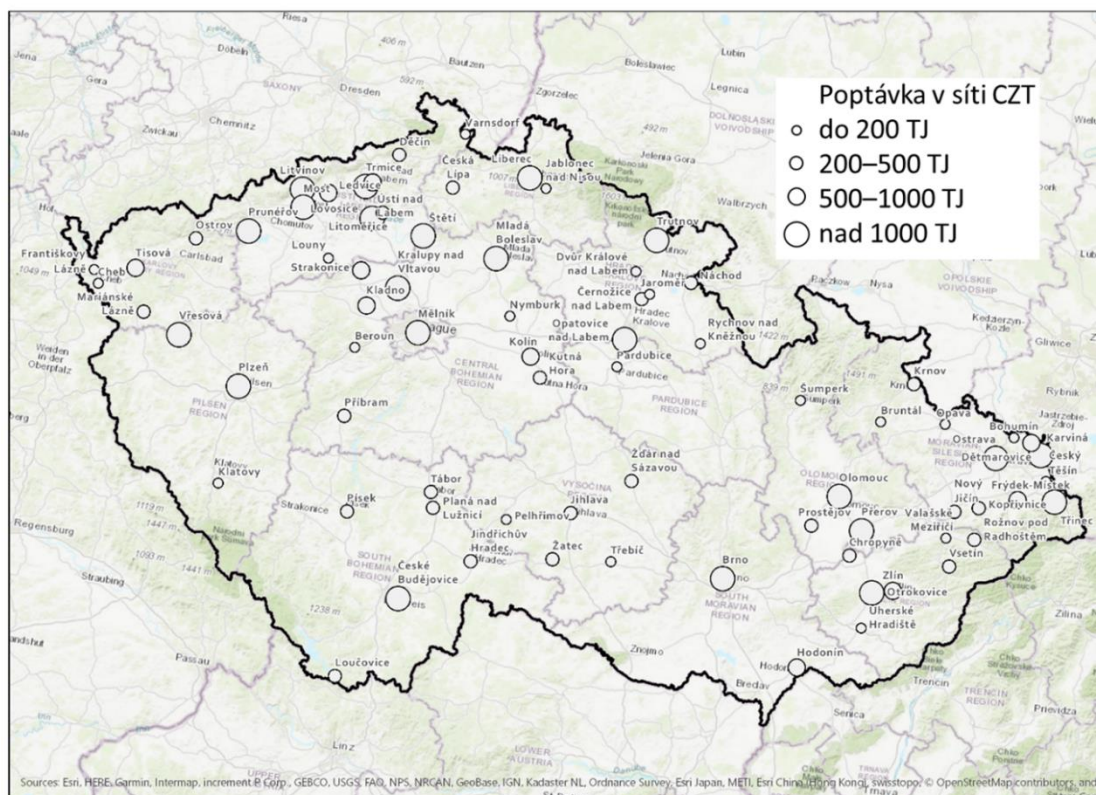
Informace byly čerpány zejména z [70], [72], [40], z výročních zpráv jednotlivých provozovatelů, jejich webových stránek a z průběžně řešených studií. Cenové lokality ne vždy odpovídají fyzickému uspořádání sítí CZT, protože v první řadě zohledňují vlastnickou strukturu. Jedna síť CZT zde tedy může figurovat v rámci několika cenových lokalit, mezi kterými dochází k přeprodeji tepla. Existují také lokality s více menšími sítěmi CZT, kde je reálné uvažovat o jejich propojení, což je třeba příklad Jihlavy. Zvláštním případem jsou potom rozsáhlejší soustavy CZT, které propojují několik měst, například:

- Elektrárna Dětmarovice – Orlová, Bohumín,
- Elektrárna Opatovice – Hradec Králové, Pardubice, Chrudim, Rybitví, Lázně Bohdaneč, Čeperka, Opatovice nad Labem a Pohřebačka,
- Elektrárna Mělník I – Pražská teplárenská soustava, Neratovice.

6.3 VÝSLEDKY

Hlavní výsledky provedené analýzy sítí CZT na území ČR jsou shrnuty v podobě tabulky v Příloze 2, která obsahuje základní parametry sítí CZT v ČR s roční poptávkou nad 100 TJ. Data odpovídají roku 2017. Tyto sítě jsou znázorněny na obr. 24.

U asi deseti lokalit byla průběžně získána také data dodávky tepla na denní, hodinové nebo minutové bázi, která byla následně využita pro analýzu vlivu časového detailu výpočtu na přesnost výsledků a také pro generování průměrné denní poptávky, pokud jsou k dispozici pouze měsíční data (viz kap. 7.1).



Obr. 24 Síť CZT na území ČR s roční dodávkou tepla nad 100 TJ [70]

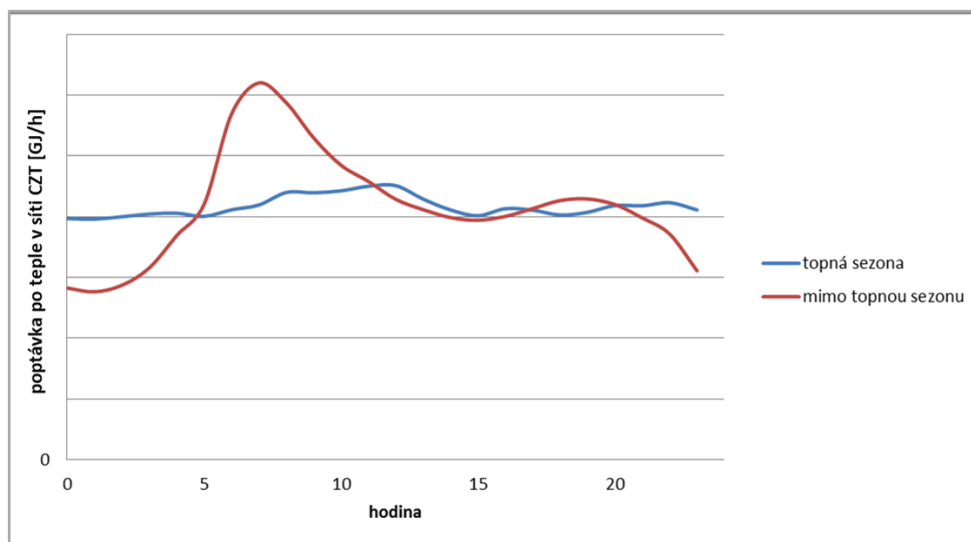
7 DÍLČÍ TECHNICKO-EKONOMICKÉ MODELY

V následujících kapitolách jsou popsány dílčí T-E modely, které mohou být využívány samostatně, avšak primárním cílem byla následná implementace do komplexních simulačních nebo optimalizačních nástrojů. Cílem je zpřesnění zejména ekonomických vstupních dat, jako je požadovaná cena za zpracování odpadu a s tím souvisejících odhadů optimálních kapacit v jednotlivých lokalitách.

7.1 NEROVNOMĚRNOST DODÁVKY TEPLA

Plánování provozu kogeneračních systémů lze z hlediska časového horizontu rozdělit do tří skupin [73]:

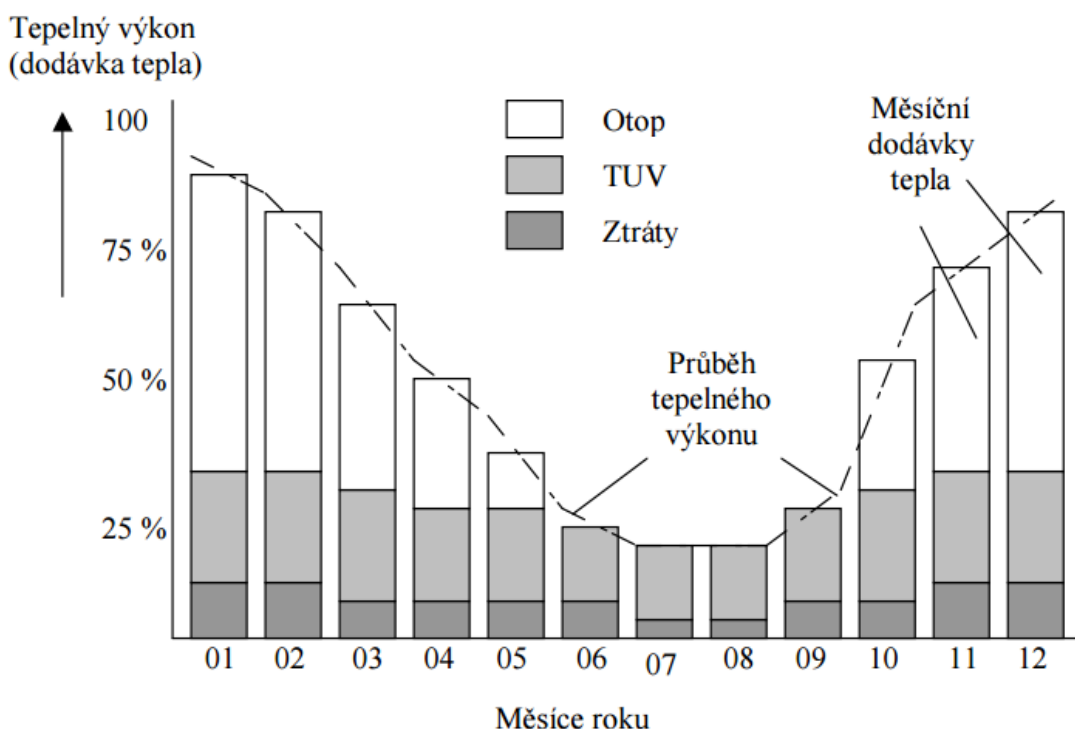
1. Krátkodobé – řádově se jedná o plánování na období jednoho dne, kde z hlediska poptávky po teple hraje roli např. denní průběh teploty vzduchu, pracovní doba nebo jiné periodicky se opakující vlivy (např. v případě zásobování průmyslového podniku teplem určitý pravidelný proces vyžadující jeho dodávku). Příklad průběhu dodávky tepla v průběhu dne v konkrétní lokalitě je znázorněn na obr. 26. Zřejmý je rozdíl mezi letním obdobím s víceméně konstantním průběhem a topnou sezonou, kde je výrazný pokles v nočních hodinách a naopak špička kolem 7. hodiny ráno. Vzhledem k tomu, že při návrhu jednotky EVO je předpokládána její životnost 20 a více let, není možné její provoz plánovat například na hodinové bázi. Krátkodobé plánování provozu ZEVO bylo řešeno v rámci [74].



Obr. 26 Diagram dodávky tepla do sítě CZT v průběhu dne – příklad v konkrétní lokalitě

2. Střednědobé – za střednědobé lze označit plánování v řádu měsíců. Na základě střednědobého plánování bývá obvykle navržena kapacita zařízení. Klíčovým faktorem jsou zde zejména rozdíly venkovní teploty v průběhu roku. V přechodném podnebí ČR jsou právě výkyvy v průběhu roku velmi významné a pro správný návrh kapacity zařízení je nutné je zohlednit. Typický roční profil dodávky tepla v síti CZT je zobrazen na obr. 27. Z obrázku je patrné období topné

sezony, které je definováno vyhláškou Ministerstva průmyslu a obchodu č. 194/2007 Sb. [75] a na území ČR trvá většinou 230 až 240 dní v závislosti na lokalitě a na teplotním profilu konkrétního roku. Začátek a konec tohoto období je charakteristický skokovým nárůstem, respektive poklesem poptávky po teple. Střednědobé plánování na měsíční bázi je také využíváno v T-E modelech vyvíjených na pracovišti ÚPI pro koncepční plánování OH. Důvodem je kromě celkového zjednodušení modelu i to, že z většiny lokalit (viz Příloha 2) nejsou k dispozici podrobnější údaje nebo není možné kvůli různým vnějším vlivům, jako je například venkovní teplota, do budoucna odhadnout spotřebu tepla v síti v jednotlivých dnech nebo dokonce hodinách.



Obr. 27 Diagram dodávky tepla do sítě CZT v průběhu roku, převzato z [60]

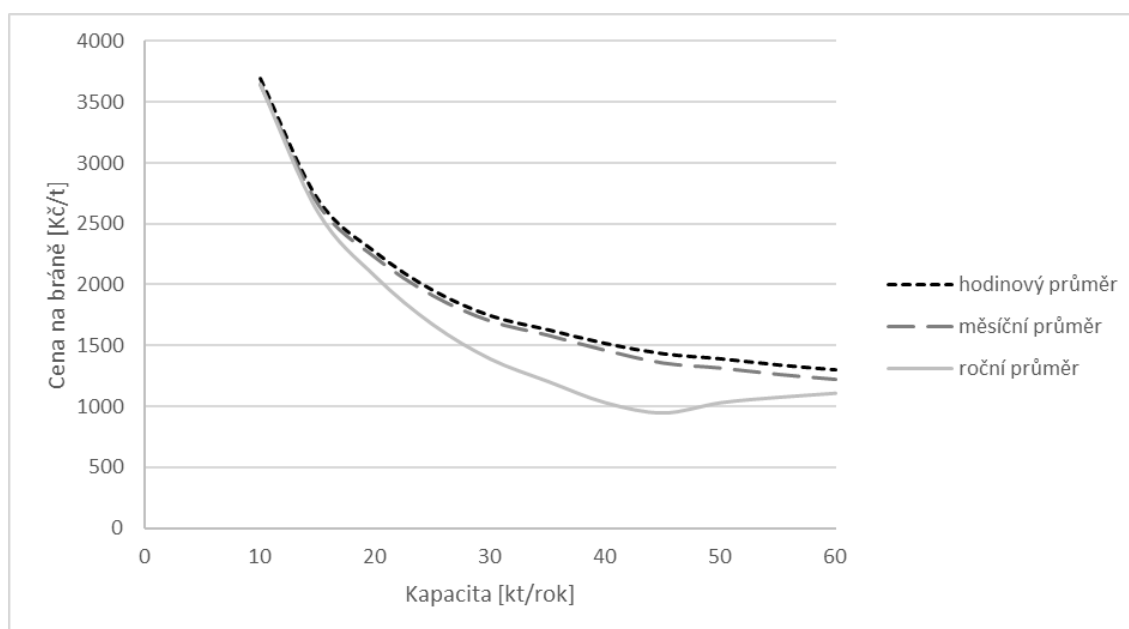
Dlouhodobé – jde o plánování s časovým horizontem jeden rok a více, které je stěžejní pro plánování investic. Životnost jednotky EVO se zpravidla pohybuje v intervalu 20-30 let [76], a proto je důležité, avšak často obtížné odhadnout, jakým způsobem se změní faktory ovlivňující ekonomiku projektu v tomto relativně dlouhém časovém horizontu. Z hlediska dodávek tepla může být zohledněn například pokles poptávky z důvodu decentralizace CZT, zateplování budov, pokles ceny tepla apod. Více informací o problematice decentralizace sítě CZT lze nalézt například v publikaci [45].

7.1.1 Analýza

V komplexních optimalizačních modelech existuje snaha o udržení přiměřeného výpočtového času. Důležitá je volba výpočtového kroku, aby byla zachována dostatečná přesnost výpočtů a zároveň aby nedošlo k nadměrnému prodloužení výpočtového času.

Byla provedena analýza, jaké chyby se dopustíme při zanedbání výkyvů v poptávce po teple na různých časových úrovních, viz obr. 28. Uvažováno je ZEVO nízké kapacity (10-60 kt/rok) s PT, kde není snížená poptávka po teple kompenzována zvýšením příjmů z prodeje elektřiny (viz kap. 5). V síti CZT existuje roční poptávka po teple asi 350 TJ. Cena tepla na patě zdroje je uvažována 200 Kč/GJ.

Jako veličina, která má ilustrovat projevy zanedbání výkyvů v poptávce po teple, byla zvolena cena za zpracování odpadu, tzv. „cena na bráně“ neboli „gate-fee“. Ta je vždy vypočtena tak, aby byla zachována požadovaná návratnost projektu – v tomto případě vyjádřená vnitřním výnosovým procentem (IRR) na úrovni 10 %. Je přitom využíváno tzv. „backsolvingu“, který byl popsán v kap. 5.5.4. Cena na bráně je nepřímo úměrná udržitelnosti projektu a schopnosti zajistit dostatečné množství odpadu. Pokud je pro požadovanou návratnost nutná příliš vysoká cena na bráně, může se stát, že se producenti odpadu rozhodnou jej zbavit jiným způsobem (např. v jiném ZEVO nebo uložením na skládku) a nedojde tak k naplnění kapacity ZEVO.

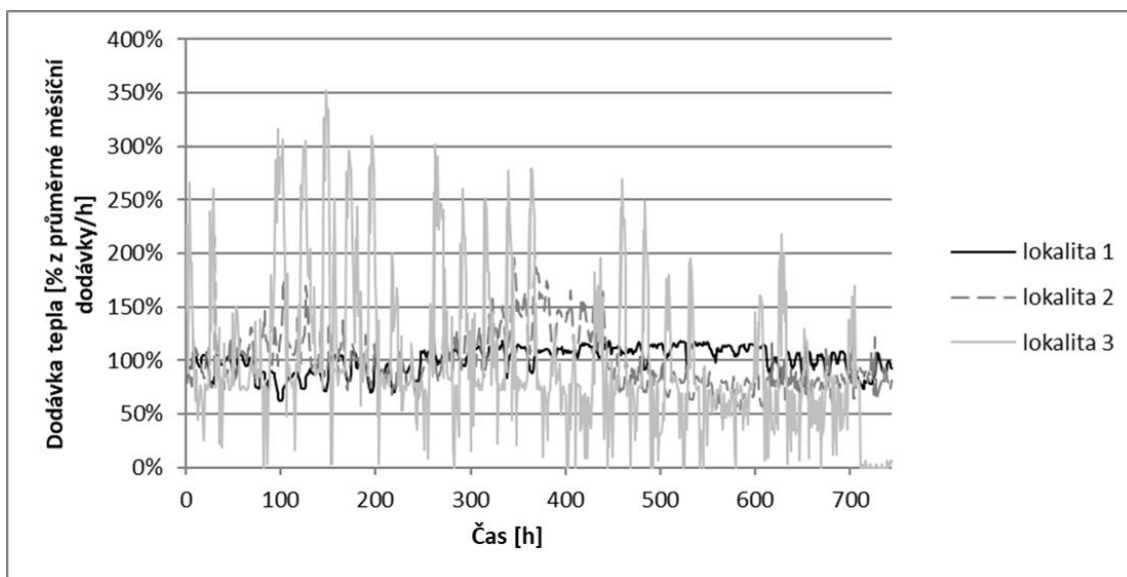


Obr. 28 Závislost ceny na bráně na kapacitě při uvažování dat o dodávkách tepla na různé časové úrovni pro konkrétní lokalitu

Příklad potvrzuje, že pro stanovení kapacity ZEVO je stěžejní postihnout změny v poptávce po teple zejména na střednědobé, tedy měsíční úrovni. Rozdíly pro kratší časové úseky (týden, den, hodina) jsou již relativně nízké, avšak stále nezanedbatelné. Větší význam má rozlišování výkyvů na kratších časových úsecích v případě, kdy je zároveň uvažován minimální výkon dalšího tepelného zdroje nebo minimální doba jeho odstavení, jak bude popsáno níže. Nejvyšší rozdíl se vyskytuje v oblasti kapacit, u kterých se maximální teoretická roční dodávka z jednotky EVO blíží celkové roční poptávce (viz obr. 30). Pro účely stanovení ceny na bráně se tedy jeví měsíční data o spotřebě tepla jako dostatečně přesná, avšak například pro posouzení možné odstávky původního zdroje tepla mohou hrát roli i krátkodobé výkonové špičky. S ohledem na další optimalizační nástroje, jejichž cílem je vyhodnocení investičních záměrů EVO, je ve výsledku

z hlediska problematiky dodávky tepla klíčové určit jeho množství, parametry (zda se jedná o horkou vodu nebo páru o určitých parametrech) a cenu na patě zdroje.

V příkladu na obr. 29 je zobrazen měsíční průběh dodávky tepla (hodinové průměry) ve třech konkrétních sítích CZT s různou velikostí a v různých měsících. Je patrné, že v některých případech, jako je třeba lokalita 3, může dodávka vykazovat značné výkyvy, kdy je v tomto případě maximální hodinová odchylka až o 252 % vyšší než měsíční průměr. Ve velké síti CZT a zimním období (lokalita 1) je oproti tomu maximální odchylka od měsíčního průměru pouze 18 %.



Obr. 29 Příklady průběhu dodávek tepla do sítě CZT

Vliv na stabilitu dodávek tepla má zejména:

- Celková velikost sítě CZT
- Povaha odběratelů – Výkyvy dodávky tepla do domácností jsou ovlivněny zejména venkovní teplotou. Pokud je teplem zásobován průmyslový podnik, záleží pak na konkrétních technologických potřebách.
- Roční období – V zimních měsících je aktuální poptávka po teple výrazně závislá na venkovní teplotě, zatímco v létě, kdy je teplo dodáváno výhradně pro ohřev teplé vody, jsou výkyvy výrazně menší (viz graf na obr. 26).

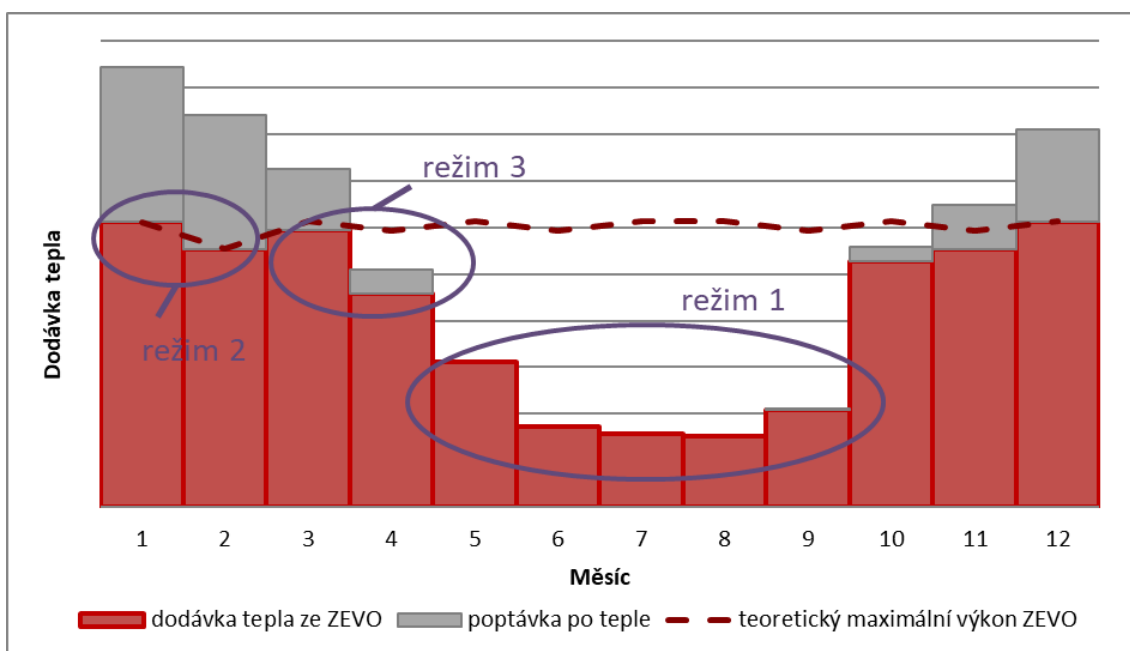
Na konkrétní lokalitě byl posouzen vliv zanedbání výkyvů v poptávce po teple na různých časových úrovních na vypočtenou ekonomiku projektu EVO.

7.1.2 Cíle

V T-E modelech jednotek EVO, které jsou vytvářeny na ÚPI, jsou využívány údaje o spotřebě tepla v síti CZT ke stanovení dodávky tepla z modelovaného zařízení. Jak už bylo zmíněno výše, tyto modely slouží zejména ke stanovení požadované ceny na bráně. Kvůli zjednodušení a zrychlení výpočtů je pracováno s daty na měsíční bázi, což bylo pro účely modelu považováno za přijatelnou úroveň přesnosti (viz obr. 28). V průběhu

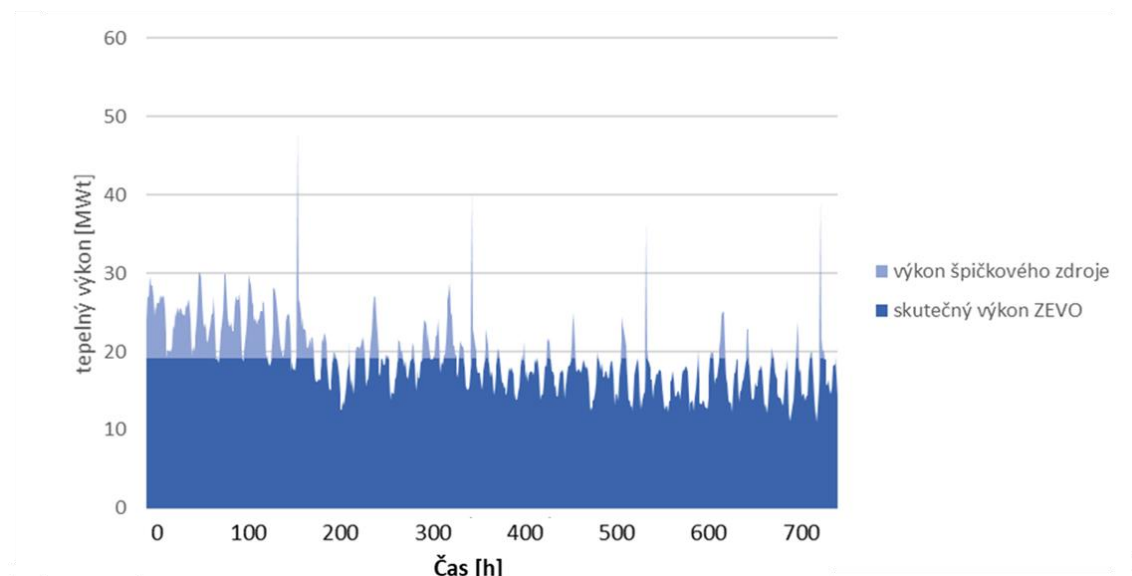
jednotlivých měsíců je tedy uvažováno s konstantním tepelným výkonem. Nebyly tím pádem zohledněny denní ani hodinové výkyvy v dodávkách tepla. Z hlediska tepelného výkonu ZEVO jsou možné tři režimy (viz obr. 30):

1. Spotřeba v síti CZT je výrazně nižší než maximální možná dodávka ze ZEVO → veškerá poptávka je pokryta (režim 1).
2. Spotřeba v síti CZT je výrazně vyšší než maximální možná dodávka ze ZEVO → během celého měsíce se uvažuje s maximálním možným tepelným výkonem z jednotky EVO (režim 2).
3. Spotřeba v síti CZT je podobná maximální možné dodávce ze ZEVO → je nutné analyzovat průběh spotřeby a výkyvy v průběhu měsíce (režim 3).



Obr. 30: Režimy dodávky tepla

I když je maximální dodávka z jednotky EVO vyšší než průměrný měsíční odběr ze sítě CZT, může nastat situace, že není možné z důvodu výkonových špiček pokrýt veškerou poptávku a je nutné využít další tepelný zdroj, což se ve výsledku promítne do zvýšení provozních nákladů. V příkladu na obr. 31 je ilustrováno, že pokud je průměrný měsíční odběr tepla ze sítě shodný s maximálním výkonem jednotky EVO, je v tomto případě možné dodat pouze asi 91 % teoretické měsíční dodávky. Není zde uvažován minimální výkon špičkového zdroje, což by vedlo k dalšímu snížení potenciální dodávky tepla ze ZEVO.



Obr. 31: Příklad měsíční dodávky tepla

Cílem tedy bylo navrhnout řešení, které by umožnilo zachovat jednoduchost výpočtu modelu na měsíční bázi, a tedy i rychlost výpočtu a zároveň zohlednilo krátkodobé výkyvy v poptávce po teple. Toho bylo dosaženo zavedením tzv. korekčních koeficientů. Na základě této analýzy byl publikován článek [77].

Pro využívání korekčních koeficientů existují dva hlavní důvody. Prvním je existence neurčitých parametrů měnících se v čase. Tyto parametry zpravidla není možné přesně předpovědět na celou dobu životnosti. Řešením je využití odhadů na delších časových úsecích v kombinaci s korekčními koeficienty. Druhým důvodem je zjednodušení matematického modelu. Přesto, že jsou vstupní data známá i na krátkých časových úsecích, model na této úrovni nemusí být řešitelný. Koeficienty tak umožní zjednodušení modelu na měsíční bázi, ale zároveň zachování jeho dostatečné přesnosti.

7.1.3 Výsledky

Za účelem zohlednění výkyvů v dodávkách tepla byla provedena analýza dat z několika sítí CZT s celkovou roční dodávkou od 130 do 10 000 TJ. Data byla k dispozici ve formě průměrných hodinových odběrů nebo průměrných denních odběrů. Cílem bylo určení korekčních koeficientů k , které budou využity pro stanovení skutečné měsíční dodávky tepla ze ZEVO. Tuto dodávku lze potom vyjádřit jako:

$$Q_{skut.}^{EVO} = Q_{teor.}^{EVO} \cdot k, \quad (2)$$

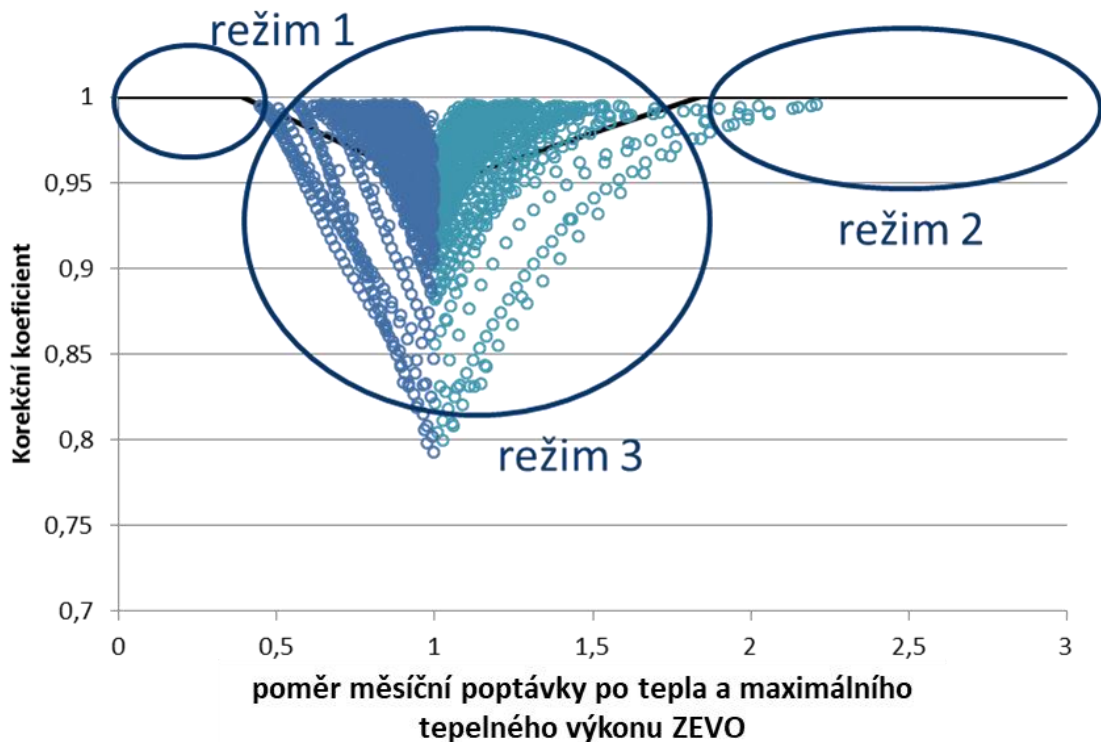
kde:

$Q_{skut.}^{EVO}$ skutečná měsíční dodávka tepla [GJ],

$Q_{teor.}^{EVO}$ teoretická měsíční dodávka tepla [GJ],

k korekční koeficient [-].

Získaná historická data byla detailně vyhodnocena. Pomocí softwaru Statistica byla zjištěna závislost korekčních koeficientů vypočtených podle reálných průběhů na různých parametrech, charakterizujících danou síť, resp. integrované ZEVO, které do dané sítě dodává teplo. Nejvyšší hodnotu korelace vykazovala závislost koeficientu k na poměru měsíčního požadavku v síti CZT a maximální dodávky z jednotky EVO. Z grafu (viz obr. 32) je patrné, že nejnižší hodnoty koeficientů lze nalézt v oblasti, kde se maximální výkon ZEVO blíží spotřebě v síti (viz režim 3 na obr. 30). Získané hodnoty koeficientů byly dále upraveny a pomocí lineární aproximace byl vytvořen model, který byl začleněn do T-E modelu ZEVO.



Obr. 32: Závislost korekčního koeficientu na poměru měsíčního požadavku v síti CZT a maximální teoretické měsíční dodávky ze zařízení EVO

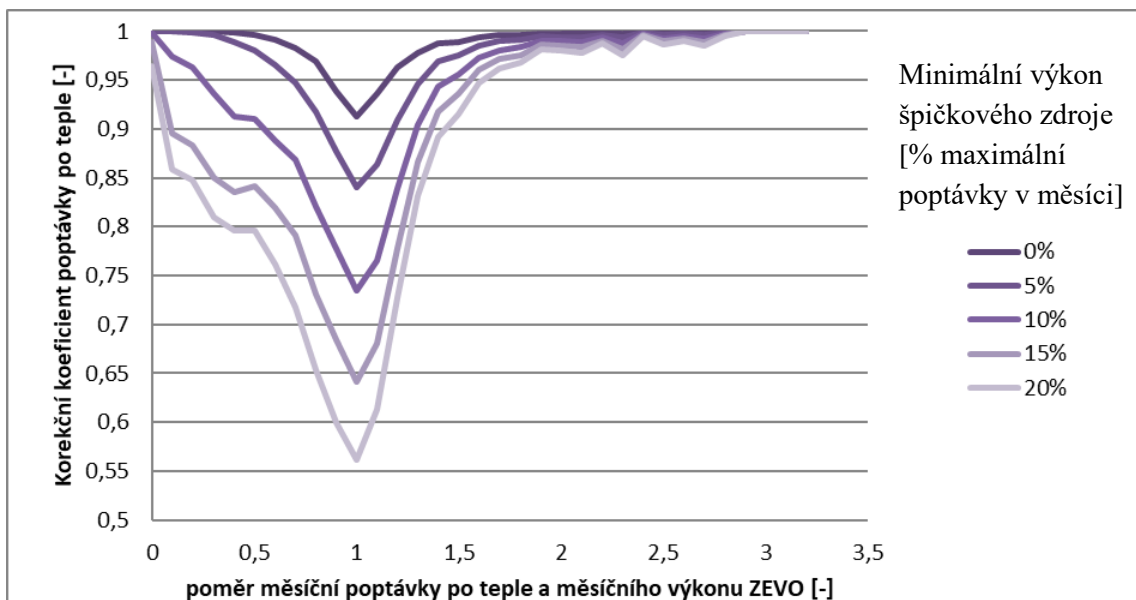
Při optimalizaci nástrojem NERUDA je pro dosažení věrohodných výsledků nutné hodnotit velké množství lokalit, kde je možné počítat s potenciální výstavbou ZEVO. V ideálním případě by do výpočtu měly být zahrnuty všechny lokality, kde lze uvažovat určitou poptávku po teple – s ohledem na výše uvedené (viz kap. 3) se jedná o několik desítek lokalit. Není možné očekávat, že budou k dispozici údaje o nerovnoměrnosti dodávek ze všech těchto lokalit. Právě pro tyto účely byl vytvořen tento model. Naopak pro podrobnější hodnocení konkrétní lokality, viz [78], [79], kde jsou tato data k dispozici, lze vytvořit model přesnější.

Korekční koeficienty – další rozpracování

Pokud je ze ZEVO dodáváno teplo do sítě CZT současně s dalším tepelným zdrojem, je kromě výkyvů poptávky po teple třeba vzít v úvahu také provozní parametry tohoto

zdroje, což je především jeho minimální výkon a možnosti odstavení. Každý zdroj tepla může být provozován v určitém rozsahu výkonu. Minimální výkon je zpravidla uváděn jako procentní podíl nominálního (maximálního) výkonu a závisí hlavně na typu spalovacích zařízení a použitého paliva. Pokud není zdroj delší dobu potřebný, je možné jej odstavit. Při odstavení parního nebo horkovodního kotle je možné kotel provozovat buď v režimu tzv. horké, nebo studené zálohy.

Pokud je do vstupních proměnných pro výpočet korekčních koeficientů zahrnutý i minimální výkon dalšího tepelného zdroje, jsou korekční koeficienty značně ovlivněny. Z grafu na obr. 33 je na příkladu jedné sítě CZT prezentován vliv tohoto minimálního výkonu na hodnotu korekčních koeficientů. Minimální výkon byl měněn v intervalu 0–20 % maximální poptávky v této síti CZT. Analýza byla provedena na období jednoho měsíce. Pokud je uvažován minimální výkon ve výši 20 % maximální poptávky – příklad předdimenzované teplárny, je možné v případě výkonu ZEVO shodného s průměrnou měsíční poptávkou v průměru v daném měsíci uplatnit pouze 56 % vyrobeného tepla oproti základnímu modelu.



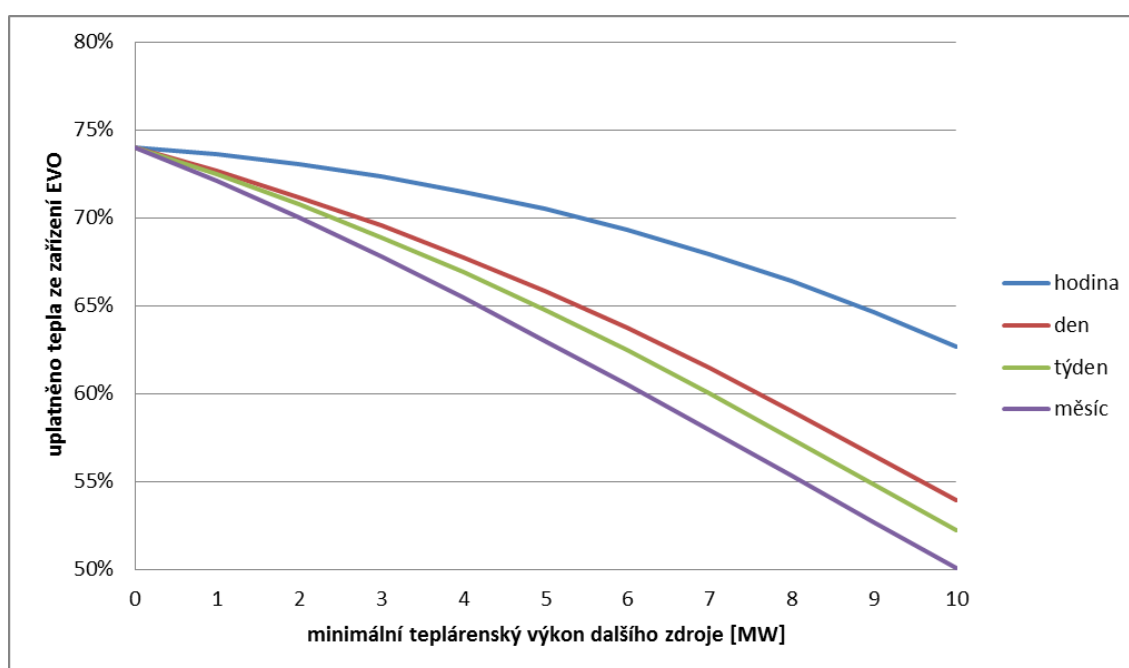
Obr. 33: Korekční koeficienty zohledňující minimální výkon dalšího tepelného zdroje

Zohlednění minimálního výkonu špičkového tepelného zdroje a minimální doby odstávky

Analýza uvedená v předchozí kapitole předpokládá, že ZEVO pokrývá spotřebu tepla v dané síti CZT za podmínky, že není vytlačován špičkový zdroj. V případech, kdy je nutné pokrýt výkonové špičky dalším zdrojem, je nutné brát v úvahu minimální výkon tohoto zdroje a určitou dobu najíždění. Pokud existuje možnost odstavení tohoto zdroje – v případě, že je ZEVO schopné pokrýt veškerou poptávku po teple – je nutné brát také v úvahu minimální dobu, na kterou je z hlediska ekonomiky a technologie vhodné kotel odstavit. Najíždění i odstavování kotle mají velký vliv na jeho životnost a hospodárnost a jedná se o technicky náročnou fázi jeho provozu. Obecně je možné odstavení kotle rozdělit na krátkodobé (10-15 h), kdy je kotel udržován v teplé záloze, při dlouhodobé

odstávce (cca do 30 dní) se jedná o tzv. studenou zálohu. Pokud je kotel odstaven na delší dobu, musí být chráněn proti korozi [80].

Zde bude nutné posuzovat zvlášť jednotlivé lokality. Pokud bude tato skutečnost zahrnuta do modelu, bude to mít za následek zvýšení vlivu koeficientů, což může v závislosti na povaze sekundárního zdroje negativně ovlivnit ekonomiku projektu EVO, případně zkomplikovat dosažení požadované účinnosti R1. V grafu na obr. 34 je na reálných datech ilustrován pokles podílu uplatněného tepla z jednotky EVO s rostoucím minimálním teplotním výkonem dalšího tepelného zdroje. Jedná se o síť CZT s celkovou roční dodávkou tepla 460 TJ a ZEVO s kapacitou 50 kt/rok. Patrný je značný vliv minimální doby, při které je už možné teplotní kotel odstavit. V případě, kdy může být špičkový zdroj provozován už od nulového výkonu, je v ilustrovaném případě uplatněno 74 % tepla ze ZEVO, což je dáno nižší poptávkou v letním období.



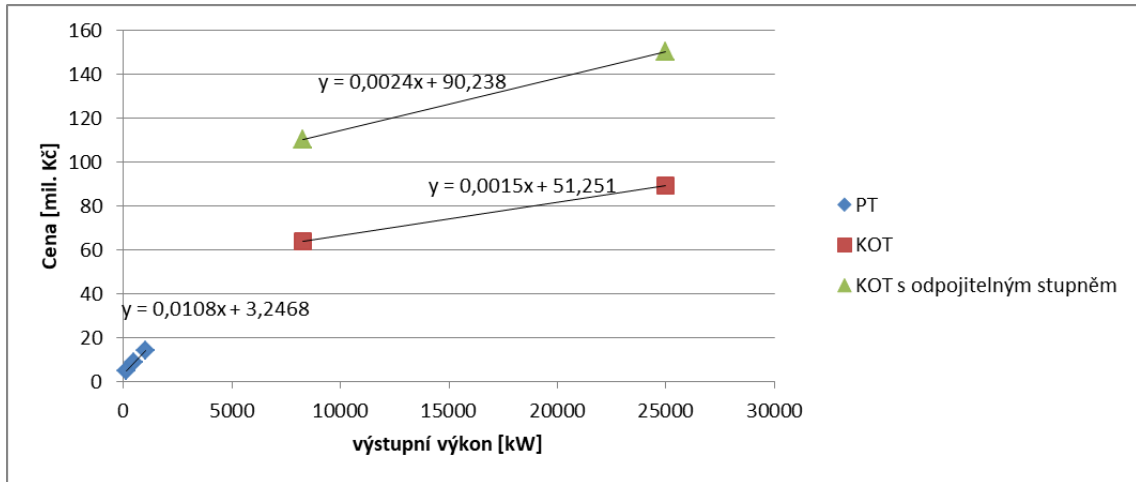
Obr. 34: Závislost množství uplatněného tepla z jednotky EVO na minimálním výkonu dalšího zdroje tepla při různých minimálních dobách jeho odstávků

Pokud má být zohledněn minimální výkon dalšího tepelného zdroje nebo minimální doba jeho odstavení, rozdíly v ceně na bráně (viz obr. 28) při různých časových krocích výpočtu budou větší.

7.2 MODEL TURBOGENERÁTORŮ

Pro optimalizační nástroj popsáný v kap. 8.2 bylo nutné vytvořit model turbogenerátorů. V případě plánování výstavby nových projektů jsou dostupné pouze výrobní charakteristiky v podobě diagramů. Pro účely T-E modelů byla autorem zpracována data získaná ze studie [81]. Cílem bylo vytvořit funkce investičních nákladů a elektrického výkonu. K dispozici byla data týkající se PT, KOT a KOT s odpojitelým kondenzačním stupněm různých výkonových variant. Využití tohoto typu turbíny má význam např.

v situacích, kdy je po významnou část roku vyšší poptávka po teple než je tepelný výkon ZEVO a není tak nutné mařit páru z kondenzačního stupně v kondenzátoru a může být tedy dosaženo vyšší energetické účinnosti. Na obr. 35 je zobrazena závislost investičních nákladů turbín na jmenovitém výkonu, která vznikla analýzou informací ze studie [81].



Obr. 35: Investiční náklady parních turbín

Z dat byly dále získány závislosti elektrického výkonu. Zatímco u PT byla vytvořena lineární závislost výkonu na protitlaku, měrném zatížení a vstupní parametry páry s využitím regresních modelů, pro výpočet elektrického výkonu u KOT musel být kvůli komplexnosti zvolen jiný přístup. Nejprve byl vytvořen lineární model maximálního elektrického výkonu v závislosti na velikosti turbíny. Ten byl poté postupně snižován koeficienty reprezentujícími pokles průtoku vstupní páry, zvýšený odběr páry, parametry odebírané páry a parametry páry na výstupu z kondenzačního stupně.

Výše zmíněné výpočtové vztahy mají silně nelineární charakter a nebylo je tedy možné v této formě využít. Z tohoto důvodu byly mírně zjednodušeny, aby nedošlo k podstatné ztrátě informace a co nejvíce se přiblížily k lineárním vztahům. Výsledný tvar rovnic pro výpočet elektrického výkonu P_{el} [MW_e] má tvar:

$$P_{el} = P_{elMAX} \cdot p_v \cdot z \quad (3)$$

$$P_{el} = ((P_{elMAX} - P_{elMIN}) \cdot (-1,35 \cdot o + 0,95) + P_{elMIN}) \cdot z, \quad (4)$$

kde P_{elMAX} [MW_e] je maximální jmenovitý výkon turbíny, P_{elMIN} minimální výkon turbíny, z [%] je procentuální zatížení turbíny, o [%] je podíl mezi tokem páry do odběru a tokem, který pokračuje do kondenzačního stupně, a p_v [%] je pokles výkonu v závislosti na tlakovém spádu, který se počítá regresním modelem. Tento model byl dále ještě více zjednodušován až do výsledné formy

$$P_{el} = a_1 \cdot P_{thin} + a_2, \quad (5)$$

kde P_{thin} [MW_t] je tepelný příkon turbíny a a_1 a a_2 [-] jsou regresní koeficienty. Zde je tedy zachována linearita a zároveň je díky koeficientu b zohledněna změna účinnosti turbíny v závislosti na průtoku páry. KOT je modelována jako několik samostatných turbín v závislosti na počtu odběrů páry. Pokud je třeba modelovat existující turbínu, byl k tomuto účelu vytvořen generátor regresních koeficientů, jehož vstupy jsou jmenovitý výkon a příkon turbíny a její typ – zda se jedná o PT nebo protitlakou nebo kondenzační část KOT.

7.3 AKUMULACE TEPLA

V rámci dalšího z dílčích T-E modelů byla provedena analýza možností akumulace tepla pro účely zvýšení účinnosti využití tepla ze ZEVO, a tedy i jejich ekonomických přínosů.

7.3.1 Analýza

V kontextu ZEVO je klíčová zejména akumulace tepla v případě režimu 3 podle obr. 30, tedy za situace, kdy je poptávka po teple příliš nízká, než aby byl možný provoz při maximálním tepelném výkonu a zároveň příliš vysoká na to, aby nebylo v delším časovém horizontu zapotřebí dalšího tepelného zdroje. V T-E modelech bylo uvažováno s konvenční technologií tepelně izolovaných akumulacních nádrží, kde je využíváno tepelné kapacity vody, přičemž lze kapacitu nádrže vyjádřit vztahem:

$$Q_{ac} = V_{ac} \cdot \rho_{H_2O} \cdot c_{H_2O} \cdot (t_2 - t_1), \quad (6)$$

kde:

Q_{ac} [GJ] je množství akumulovaného tepla

V_{ac} [m³] je objem akumulacní nádrže

ρ_{H_2O} [kg/m³] je hustota vody

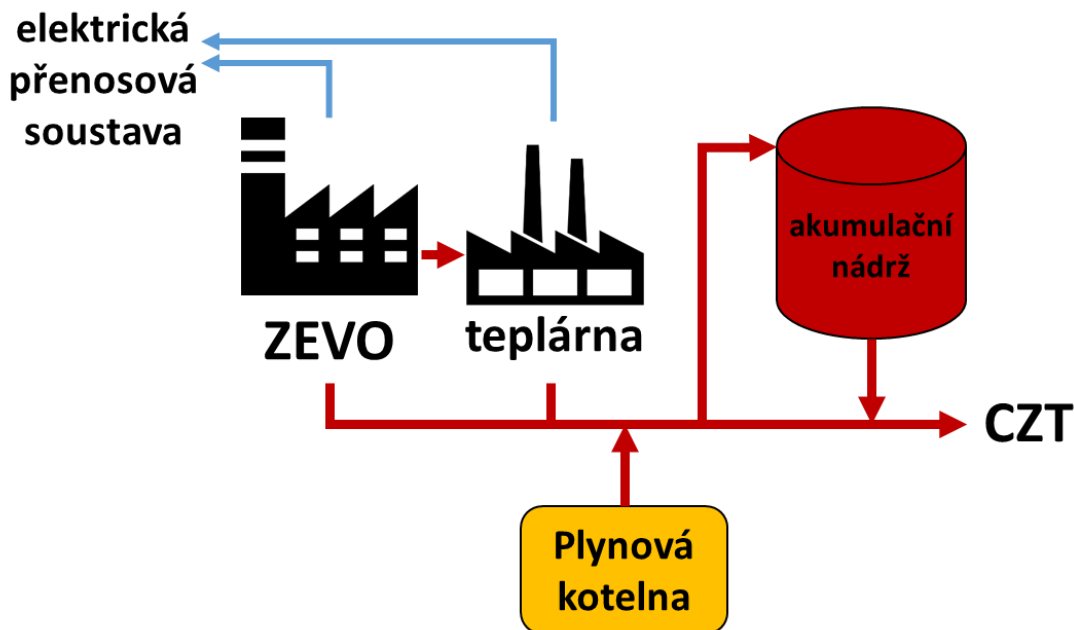
c_{H_2O} [kJ/kg·K] je měrná tepelná kapacita vody

t_1 [°C] je minimální přípustná teplota akumulacní vody

t_2 [°C] je maximální teplota akumulacní vody

Vodní akumulacní nádrže lze rozdělit na tepelně rozvrstvené (stratifikační), kde je voda s nejvyšší teplotou v horní části, a promíchané, kde má voda přibližně konstantní teplotu v celém objemu [82]. Akumulací tepla pro účely CZT se zabývá např. [83] nebo [84].

Na obr. 36 je pro ilustraci schéma využití akumulace tepla v síti CZT, kam je dodáváno teplo ze ZEVO, teplárny a plynové kotelny (PK) jakožto špičkového a záložního zdroje. V článku [85] byla provedena simulace provozování sítě CZT na krátkých časových úsecích (viz kap. 7.1) metodou Monte Carlo. Cílem bylo vyhodnotit vliv neurčitých parametrů týkajících se trhu s elektřinou. Autoři tvrdí, že díky využití akumulace tepla se zvýšil denní výnos o 11 %.



Obr. 36: Schéma využití akumulace tepla

7.3.2 Cíle

V rámci dizertační práce byl autorem vytvořen optimalizační model popisující akumulaci tepla, jehož cílem je vyhodnotit, zda je v daném případě vhodné využít akumulaci tepla a případně doporučení optimální kapacity akumulacích nádrží. Byla využita vstupní data z veřejně dostupných zdrojů uvedených v této kapitole. V této oblasti byl identifikován potenciál dalšího rozvoje, který bude předmětem budoucí práce.

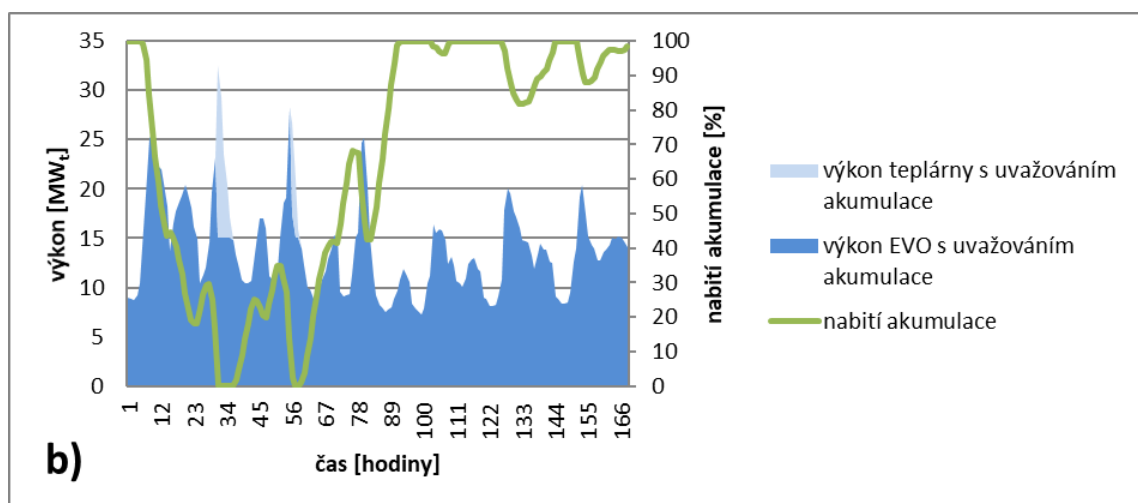
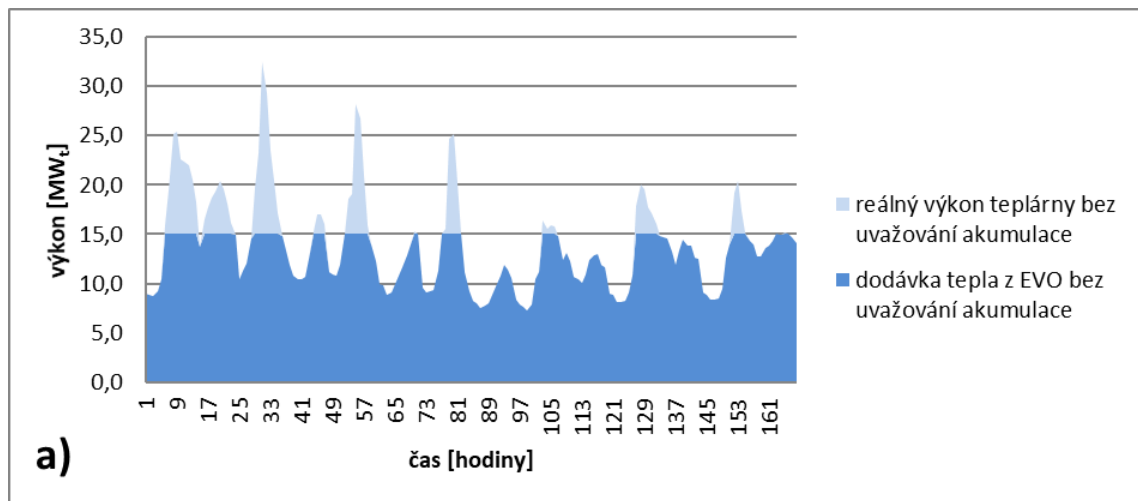
V určitých případech může roli akumulace částečně plnit i samotná soustava CZT. V rozsáhlejších sítích cirkuluje řádově několik tisíc m^3 vody, která je pak zejména při letním provozu schopna sama o sobě vyrovnat výkonové špičky.

Pokud by nebyla tepelná kapacita samotné sítě dostatečná, je možné uvažovat o instalaci akumulacích nádrží. Akumulaci je možné realizovat prostřednictvím různých technologií a s cílem vyrovnání jak krátkodobých (hodiny, dny), tak i dlouhodobých (roční období) výkyvů v poptávce po teple. V závislosti od zvolené technologie se odvíjí i využitelný teplotní rozsah.

Typickým příkladem vhodného využití akumulace v případě výstavby ZEVO může být pravidelné zvýšení poptávky po teple kvůli ochlazení v noci, tedy dimenzování objemu nádrží pro vyrovnání denních výkyvů (viz obr. 26).

Na obr. 37 je na příkladu ukázáno, jakým způsobem může být využita akumulace tepla. Je uvažováno ZEVO s maximálním tepelným výkonem $15 MW_t$, což odpovídá přibližně kapacitě 60 kt/rok a časový úsek jeden týden. Dále je posuzována akumulací nádrž s využitelnou tepelnou kapacitou 100 MWh. Pokud je akceptovatelný teplotní rozsah akumulací vody $20^\circ C$, pak tuto kapacitu představují nádrže o celkovém objemu asi $4300 m^3$. V prvním případě (obr. 37 a) je během týdne dodáno zařízením EVO $2105 MWh_t$ tepla, s využitím akumulace (obr. 37 b) $2290 MWh_t$, což je asi o 9 % více. Největší potenciál má akumulace ovšem v období, kdy umožní například odstavení

celého bloku dalšího tepelného zdroje. V tomto případě se finanční úspora dramaticky zvyšuje.



Obr. 37: Vliv akumulace na dodávku tepla do sítě CZT

Pozn.: a) bez uvažování akumulace, b) s uvažováním akumulace

7.3.3 Výsledky

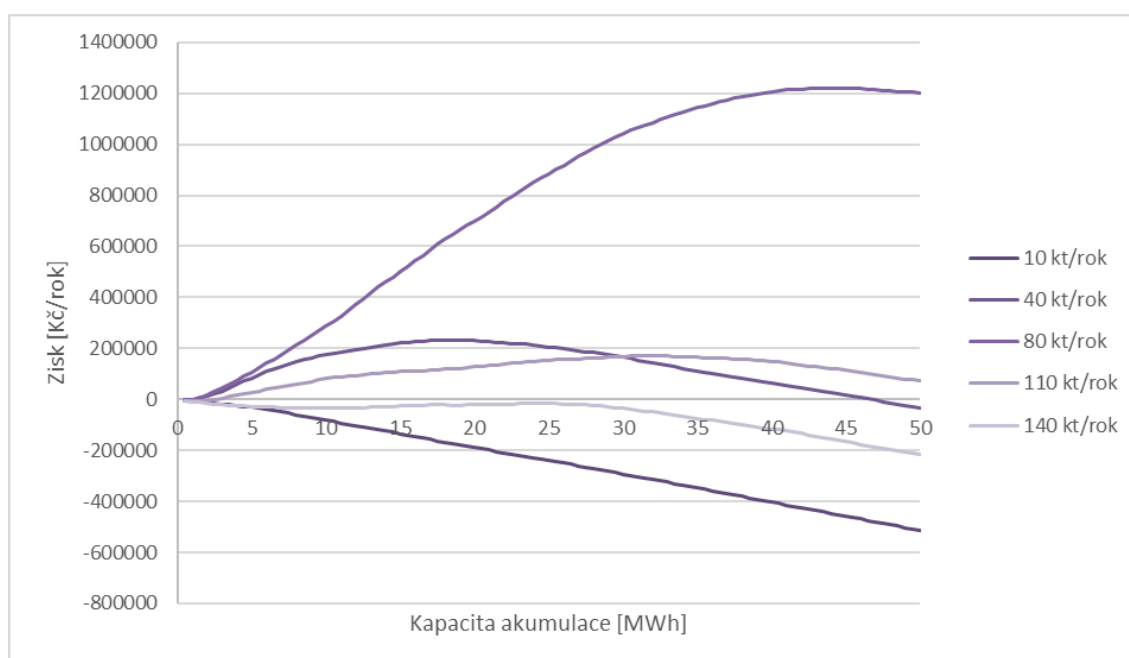
Nejefektivnější využití akumulace z pohledu kompromisu mezi investičními náklady do akumulačních nádrží a vyrovnání výkyvů v poptávce po teple je akumulace v řádu hodin. Hlavním účelem je tedy vyrovnání rozdílu mezi minimální poptávkou po teple v noci a maximální v ranních hodinách (viz obr. 26). Vliv akumulace tepla není možné efektivně zahrnout do optimalizačních nástrojů pracujících na měsíční bázi.

Předpokladem je vytvoření závislosti vlivu akumulace tepla prostřednictvím charakteristických parametrů (např. objem akumulační nádrže, přípustný pokles teploty topné vody apod.). Předmětem optimalizace bylo dimenzování akumulační nádrže, tedy hledání kompromisu mezi investičními náklady a zvýšením příjmů z prodeje tepla, případně zvýšením energetické účinnosti. Byl tedy vytvořen dílčí T-E model využívající

reálná data poptávky po teple na hodinové bázi. Klíčovým vstupním parametrem byly investiční náklady do akumulčních nádrží.

Měrné investiční náklady byly pro účely modelu odhadnuty na základě realizace akumulace tepla v rámci Teplárny Tábor, a.s. v podobě čtyř tlakových nádrží o celkovém objemu 400 m³ a kapacitě 63 MWh ve výši 295 tis. Kč/MWh [86]. Závislost měrných nákladů na velikosti (kapacitě) nádrží byla zanedbána, stejně jako inflace. Živostnost akumulčních nádrží byla uvažována 25 let. Provedené analýzy ukázaly, že dimenzování akumulčních nádrží závisí jak na relativních výkyvech v poptávce po teple, tak i tepelného výkonu ZEVO a velikosti sítě CZT. Jinými slovy dává akumulace tepla největší smysl v případech, kdy se ZEVO pohybuje největší část roku v režimu 3 dle obr. 30.

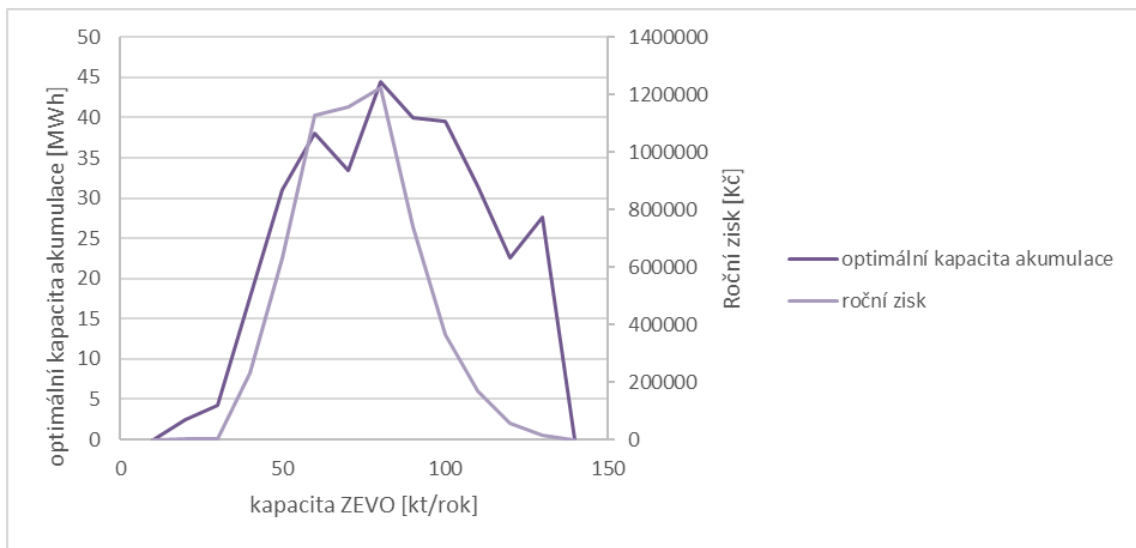
Příklad na obr. 38 ukazuje ziskovost investice do akumulčních nádrží v závislosti na jejich kapacitě pro různá kapacitní řešení ZEVO. Uvažována byla síť CZT s roční poptávkou 388 TJ/rok.



Obr. 38: Závislost ziskovosti investice do akumulčních nádrží na kapacitě akumulace

Je zřejmé, že u nižších kapacit ZEVO není v tomto případě realizace akumulčních nádrží výhodná, protože je možné uplatnit veškeré vyrobené teplo v průběhu roku. Investice do menších akumulčních nádrží se začíná vyplácet v případě kapacit, které krátkodobě pokrývají celou poptávku v letním období. Obr. 39 ukazuje ekonomicky optimální kapacitu akumulace v závislosti na zpracovatelské kapacitě ZEVO. Největší přínos má v tomto případě akumulace 44,5 MWh při realizaci ZEVO s kapacitou 80 kt/rok, která přinese zisk asi 1,2 mil. Kč/rok. Při provozních teplotách 150°C/60°C (tlaková akumulace topné vody o teplotě 150°C) této kapacitě pro představu odpovídá objem nádrží asi 425 m³. S rostoucí kapacitou ZEVO dochází k využití akumulace v kratším období a zároveň rostou i investiční náklady. Výpočtem bylo potvrzeno, že v případě realizace ekonomicky nejvýhodnější kapacity akumulace je průměrná doba konstantního nabíjení

4-5 h, vybíjení potom 3-4 h a jedná se tedy zejména o vyrovnání denních výkyvů v poptávce po teple.



Obr. 39: Závislost optimální kapacity akumulace tepla a maximálního zisku na kapacitě ZEVO

8 KOMPLEXNÍ ÚLOHA MODELOVÁNÍ SYNERGIE ZEVO A DALŠÍCH ZDROJŮ TEPLA

Při plánování projektu EVO jakožto dalšího tepelného zdroje, který má být připojen do sítě CZT k již existujícímu tepelnému zdroji, je důležitý odhad akceptovatelné ceny a jeho množství ze ZEVO. Pro řešení tohoto problému je důležitá znalost struktury sítě CZT a vychází tedy z výše zmíněných kapitol týkajících se analýzy sítě CZT. Zároveň se jedná o stěžejní část dizertační práce.

Jedná se o komplexní problém, kdy je nejprve nalezen ekonomicky optimální režim provozu ZEVO a dalšího tepelného zdroje v rámci jedné sítě CZT a na jeho základě je následně vyčísleno množství a cena tepla z jednotky EVO. Přitom je snaha do optimalizačního výpočtu zahrnout všechny výše zmíněné podstatné aspekty, tedy nerovnoměrnost poptávky po teple, nutnost zálohy (viz kap. 7.1), možnosti akumulace tepla (viz kap. 7.3) a další okolnosti ovlivňující dodávku tepla ze všech tepelných zdrojů.

V následující kapitole je podrobněji představen tento postup, který bude následně prezentován na příkladech konkrétních lokalit. Cílem je stanovit výnosy z prodeje tepla a elektřiny. Při jejich znalosti již bylo možné s využitím T-E modelu odhadnout závislost ceny na bráně na zpracovatelské kapacitě a na dalších klíčových parametrech jednotky.

Následující kapitoly nastiňují provedené činnosti v souvislosti se spoluprací (synergií) ZEVO s dalším tepelným zdrojem. Nejprve je popsán model pro odhad akceptovatelné ceny tepla v případě kompletní náhrady původního tepelného zdroje ZEVO a špičkovou PK. V rámci komplexnějšího přístupu byl dále vytvořen model pro optimalizaci provozu při integraci ZEVO do sítě CZT s existujícím tepelným zdrojem.

8.1 NÁHRADA PŮVODNÍHO TEPELNÉHO ZDROJE SOUBOREM ZEVO A PLYNOVÁ KOTELNA

Kromě toho, že z hlediska emisí CO₂ je uhlí z běžně využívaných paliv nejhorší varianta [87], může se provoz některých uhelných tepelných zdrojů stát neekonomickým. Jedním z důvodů je plánované zpřísnění emisních limitů pro tepelné zdroje nad 50 MW_t od roku 2021 [88], jejichž plnění bude při spalování českého hnědého uhlí značně obtížné, případně bude vyžadovat nemalé investice do ekologizace. Dalšími důvody může být končící doba životnosti zdrojů nebo například postupné snižování poptávky po teple a s tím související nevhodné dimenzování výkonu stávajících teplárenských kotlů. Tyto okolnosti budou v některých lokalitách s CZT vyžadovat změnu koncepce zajištění dodávek tepla. Řešením této situace může být právě výstavba ZEVO spolu s PK. Jedná se v podstatě o nejjednodušší případ integrace ZEVO do teplárenské sítě.

Při plánování projektu ZEVO je ve většině případů uvažováno s převzetím části dodávky tepla v CZT, do něho již teplo dodává existující tepelný zdroj. S využitím T-E modelů byl posouzen potenciál kompletního pokrytí poptávky po teple ze ZEVO a PK. ZEVO zajišťuje základní dodávku tepla, zatímco PK plní roli špičkového a záložního zdroje tepla. Byla provedena analýza vztahu mezi realizovanou kapacitou ZEVO při dané velikosti sítě CZT a ekonomickou udržitelností projektu.

8.1.1 Analýza

S využitím T-E matematických modelů byla posouzena ekonomika souboru ZEVO a PK. Jsou uvažovány další okrajové podmínky, jako je pokrytí veškeré poptávky po teple nebo provozní parametry obou zdrojů tepla. Dále je ekonomicky optimální způsob provozu obou zdrojů prezentován na základě provozních dat ze skutečných tepláren, přičemž je uvažován typický profil poptávky po teple v průběhu roku a fluktuace v různých časových úrovních.

ZEVO vzhledem k výše zmíněnému požadavku na dosažení účinnosti R1, nepravidelnému ročnímu profilu poptávky po teple a poměrně vysokým měrným investičním nákladům není vhodné dimenzovat na maximální poptávku po teple, kterou lze v síti CZT očekávat. Z energetického hlediska je tak u malých ZEVO optimálním řešením realizace nižší kapacity, tedy i tepelného výkonu, a pokrytí špiček v poptávce po teple z PK, která zároveň plní funkci tepelné zálohy pro případ výpadku ZEVO. Předpokladem navrženého přístupu je provozování všech tepelných zdrojů ve vzájemně optimálním režimu.

Rešerší bylo zjištěno, že ve většině publikací, které nějakým způsobem řeší dodávku tepla ze ZEVO, uvažuje jeho napojení do dostatečně velké sítě CZT, takže zařízení může fungovat jako tzv. „base-load“ zdroj. Zbytek poptávky po teple je distribuován z dalších tepelných zařízení. Příkladem takového přístupu je třetí hypotéza v článku [89], který se zabývá ZEVO jak z ekonomického, tak i z environmentálního pohledu.

8.1.2 Cíle

V první fázi byl autorem vytvořen T-E model horkovodní PK, který byl následně propojen s T-E modelem ZEVO. Základ poptávky po teple v CZT je pokrýván ze ZEVO. PK zajišťuje pokrytí špiček v poptávce a tepelnou zálohu během topné sezony. Proměnné v modelu jsou velikost CZT a kapacita (tepelný výkon) ZEVO. Je předpokládána realizace akumulčních nádrží odpovídající velikosti pro vyrovnání výkyvů v poptávce v průběhu jednoho dne, viz kap. 7.3. Díky tomuto předpokladu jsou krátkodobé fluktuace zanedbány a model je počítán na denní bázi, tj. 365 časových intervalů. Funkce modelu jsou níže prezentovány na případové studii. Uvedené předpoklady umožňují využití relativně jednoduchého matematického modelu. Důvodem je použití pouze jednoho kotle, respektive více kotlů, ale se stejnými parametry a zejména absence výroby elektřiny. Situaci, kdy je uvažována synergie ZEVO s komplexním zdrojem (teplárnou), se věnuje kap. 8.2.

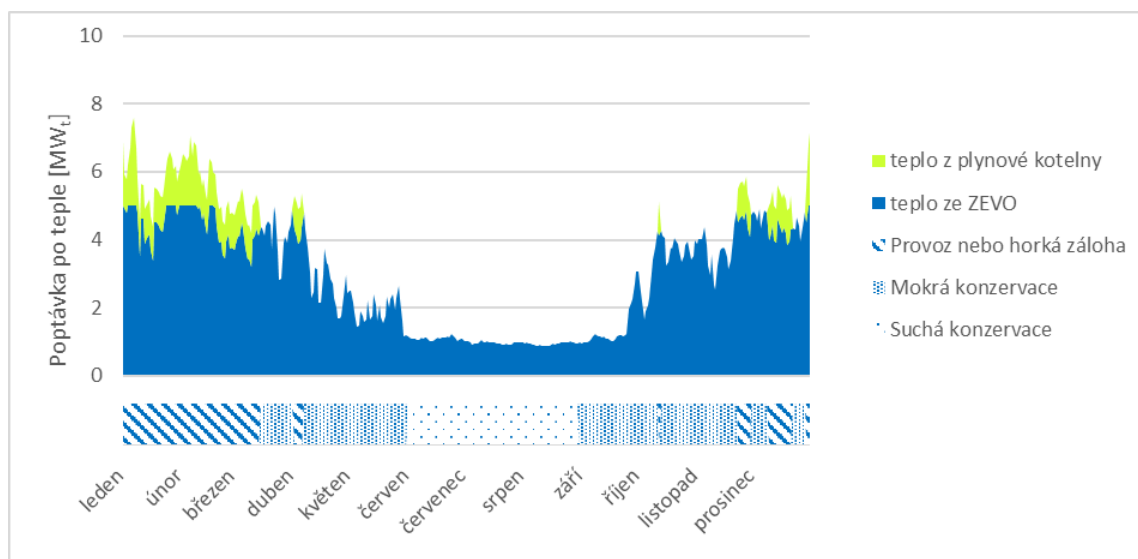
8.1.3 Výsledky

Pro modelování poptávky po teple byla využita reálná provozní data z CZT s roční poptávkou asi 600 TJ, která byla zprůměrována v jednotlivých dnech. Změna poptávky byla docílena jednoduše násobením koeficientem $k \leq 1$ tak, aby byla výsledná poptávka v intervalu 100-600 TJ/rok. Výkonově je PK vždy dimenzována na úrovni 150 % maximální průměrné denní poptávky v roce bez ohledu na kapacitu ZEVO. Provedená analýza provozních dat ukazuje, že zhruba tato hodnota odpovídá výkonovým špičkám v zimním období. V závislosti na nastavené velikosti CZT to představuje interval 10-60 MW_t. V modelu je předpokládáno, že PK je v závislosti na jmenovitém výkonu

složena z jednoho až tří modulů, z nichž nejmenší se vždy uvažuje s výkonem 10 MW_t. Pro PK s výkonem 10 MW_t to například představuje jeden 10 MW_t modul, pro PK s výkonem 30 MW_t jeden 10 MW_t a jeden 20 MW_t modul apod. Tím je zajištěn široký regulační rozsah v rozmezí 10 % nejmenšího modulu (tedy 1 MW_t pro všechny výkony PK) až plného výkonu všech modulů.

V době, kdy poptávka po teple převyšuje výkon ZEVO, je zbývající teplo dodáváno z PK, přičemž musí být respektován její minimální výkon. Pokud je poptávka kompletně pokryta ze ZEVO, je možné PK odstavit. Odstavení je uvažováno za podmínky nepřetržité nepotřebnosti PK po dobu alespoň jednoho týdne. Během topné sezony musí být PK udržována v režimu zálohy. To představuje i při odstavení naplněný kotel (tzv. režim mokré konzervace) a obsluhu v pohotovosti, aby bylo v případě potřeby možné najetí na plný výkon v horizontu několika hodin. Mimo topnou sezону, která v podmínkách ČR trvá typicky od 1. září do 31. května je v případě nepotřebnosti možné přistoupit k vypuštění kotle (tzv. režim suché konzervace). V tomto období ZEVO zajišťuje pouze ohřev TUV a případný cca dvoudenní výpadek dodávky tepla (do najetí PK nebo obnovení dodávky ze ZEVO) není velkým problémem. Výhodou suché konzervace je částečné snížení provozních nákladů, zejména na obsluhu.

Příklad pokrytí poptávky po teple pro CZT s poptávkou 100 TJ/rok, PK s jedním modulem o výkonu 10 MW_t a ZEVO s výkonem 5 MW_t (asi 20 kt/rok) je na obr. 40. V zobrazené situaci je ze ZEVO plně pokryta poptávka po teple v 263 dnech. V zimních měsících musí být výkonové špičky pokryty z PK. Například v lednu nebo březnu jsou patrné propady v dodávce tepla ze ZEVO právě z důvodu nutnosti provozování PK při minimálním výkonu. Zde je důležité zmínit, že pokud je při současném provozu ZEVO a PK nutné přebytečné teplo mařit, za předpokladu společného provozovatele obou zařízení není důležité, odkud mařené teplo pochází. Kvůli poskytování tepelné zálohy je PK odstavena metodou suché konzervace pouze v letních měsících přesto, že ani v květnu a září není dodatečné teplo potřeba.



Obr. 40 Příklad pokrytí poptávky po teple ze ZEVO a PK

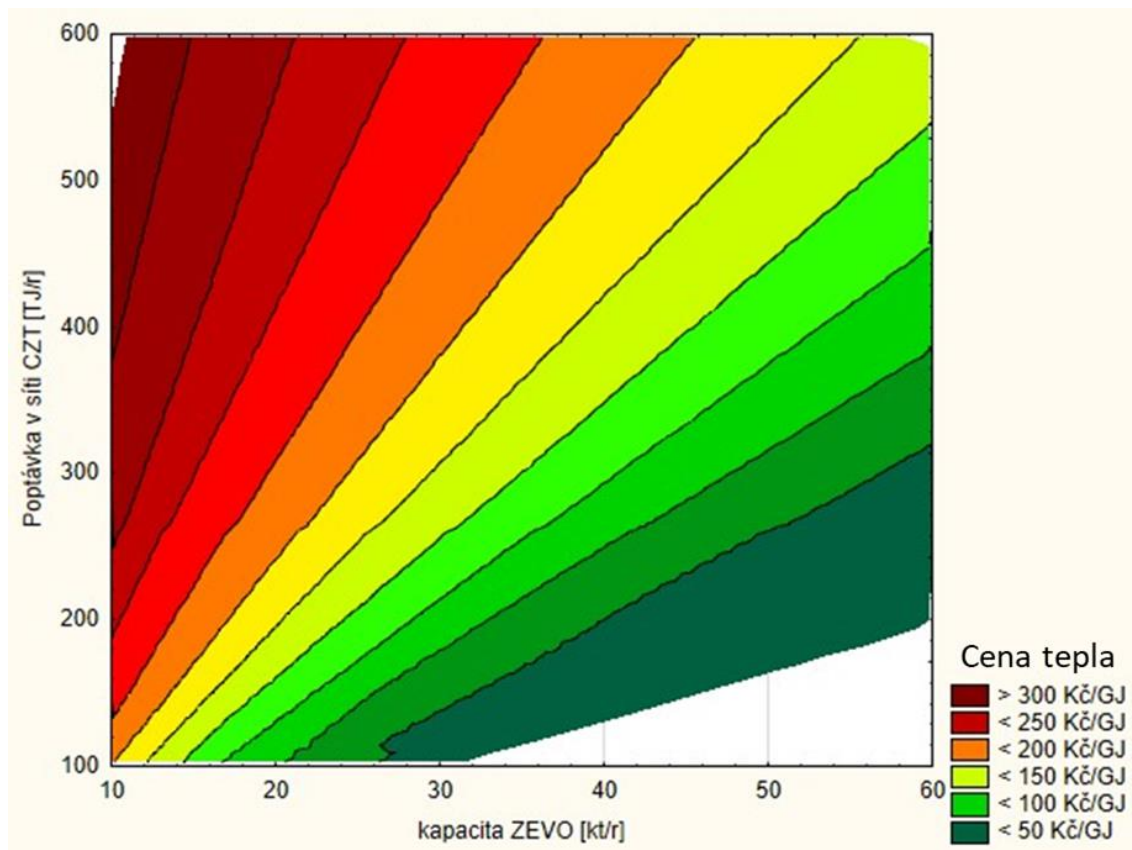
V modelu byly na denní bázi vyčísleny náklady na provoz PK, které byly následně sečteny za celý rok. Hlavní položky nákladů rozdělené do tří skupin sumarizuje tab. 4. Vstupní data pro T-E model byla získána ze studie [90]. Náklady na obsluhu lze uvažovat na pomezí fixních a variabilních nákladů proto, že sice nejsou závislé na aktuálním výkonu, ale je předpokládáno jejich částečné snížení při dlouhodobém odstavení v letním období. To je i případ nákladů na údržbu.

Tab. 4: Uvažované náklady plynové kotelny

Investiční náklady	Fixní provozní náklady	Variabilní provozní náklady
Odpisy	Obsluha Údržba Revize, seřízení a zkoušky	Obsluha Zemní plyn Voda Elektřina

Jak je zmíněno výše, hlavním výstupem tohoto dílčího modelu jsou roční náklady na provoz PK v závislosti na velikosti sítě CZT a tepelném výkonu (kapacitě) ZEVO. Výpočet těchto nákladů byl proveden pro 100 různých variant velikosti CZT a 100 variant velikosti ZEVO, což celkem představuje 10 000 výpočtů. Tyto náklady byly následně přepočteny na GJ tepla dodaného do CZT a vyjadřují tak snížení výnosů za jednotku tepla na vstupu do CZT pro ZEVO. Předpokládá se tedy, že ZEVO dotuje provoz PK. Vzniklá závislost je pro ilustraci na obr. 41. Pro představu byla dle přehledu cen tepelné energie, který vydává ERÚ, uvažována průměrná cena tepla do CZT z výroby v roce 2017 ve výši 243 Kč/GJ včetně DPH.

S rostoucí kapacitou, a tedy i tepelným výkonem ZEVO náklady na provoz PK klesají až na úroveň fixních nákladů, které jsou u těchto zařízení ve srovnání s variabilními poměrně nízké. Bílá oblast (viz obr. 41) u malých CZT a větších kapacitách ZEVO představuje situace, u nichž lze kvůli nízkému uplatnění vyrobeného tepla očekávat nedostatečné hodnoty účinnosti R1 a nebyly proto do výpočtů zahrnuty. Tyto dodatečné náklady na provozování PK se přirozeně snižují s rostoucí kapacitou ZEVO, kdy však klesá podíl využitého tepla ze ZEVO.



Obr. 41 Závislost nákladů na provoz plynové kotelny vztahených na dodané teplo

Tyto výsledky byly dále využity jako vstupy do T-E modelu Flexi, který je blíže popsán v [91], přičemž je uvažováno technologické řešení popsané v kap. 5, tj. ZEVO nízké kapacity s roštovým spalováním a výrobou páry v kotli o teplotě 220°C a tlaku 13 bar využívající točivou redukci pro výrobu elektřiny. Za ní pára kondenzuje ve výměníku pro ohřev vody pro CZT. V období nízké poptávky je přebytečné teplo mařeno ve vzduchových chladičích. Systém čištění spalin je řešen tzv. suchou metodou spočívající v rozprašování sorbentů a adsorbentů do spalin a jejich následné filtraci.

Protože je uvažován společný vlastník ZEVO i PK, jsou výnosy z prodeje tepla závislé pouze na velikosti CZT a ceně tepla na vstupu do CZT. Jinými slovy je v modelu ZEVO uvažováno vždy s pokrytím celé poptávky bez ohledu na tepelný výkon ZEVO. Teplo dodané z PK je v modelu zohledněno právě formou nákladů na provoz PK (viz obr. 41). Ty jsou z výše popsaného modelu PK získány metodou kvadratické regrese.

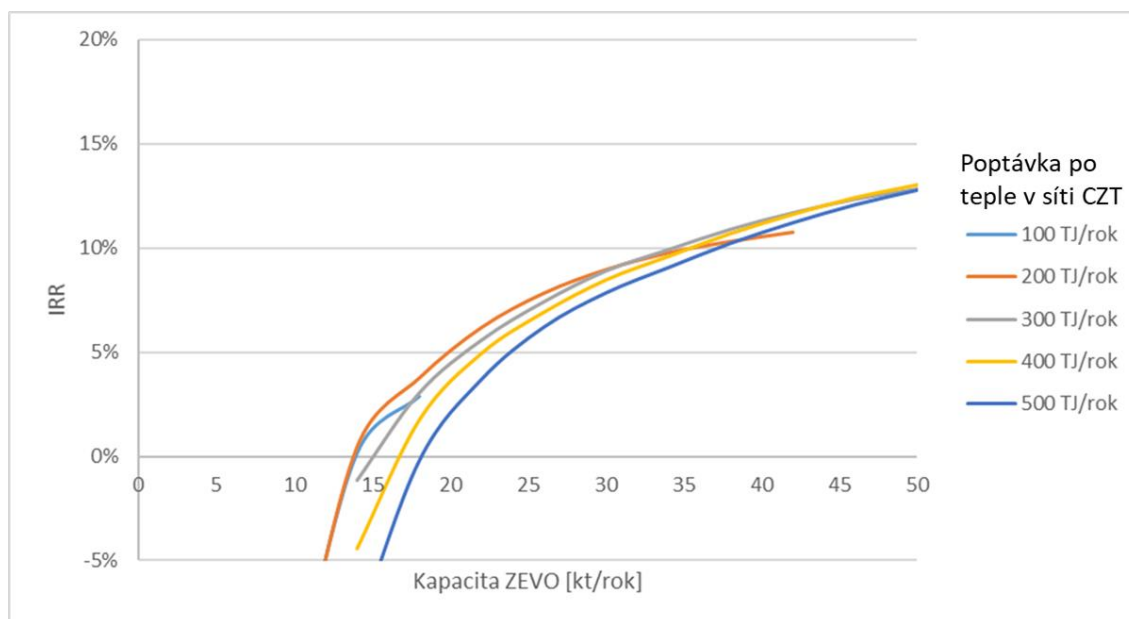
Jak už bylo zmíněno výše, klíčové jsou pro ekonomiku malých projektů EVO výnosy ze zpracování odpadu a z prodeje tepla. Cena za zpracování odpadu je závislá na mnoha těžko předvídatelných okolnostech. Jejím odhadem se formou stochastické optimalizace zabývá [64]. Pro účely prezentovaného modelu byla stanovena pevně pro všechny kapacity na úrovni 2 250 Kč/t v roce realizace (2025). Při posuzování konkrétní lokality je možné provést přesnější odhad.

Co se týče akceptovatelné ceny tepla na vstupu do CZT, závisí opět na více faktorech jako je například technický stav a stáří CZT, tepelné ztráty. Například [92] uvádí rozdílné

ceny tepla v průběhu roku v severských zemích, kde cena v letních měsících výrazně klesá.

Stejně jako u modelu PK bylo opět provedeno 10 000 výpočtů pro různé kombinace kapacity ZEVO a velikosti CZT. Na výstupu z primárních rozvodů se v roce 2017 pohybovala cena tepla kolem 400 Kč/GJ [70]. Při zohlednění dalších nákladů na distribuci je cena na patě ZEVO (na vstupu do CZT) odhadnuta na 250–300 Kč/GJ. Při realizaci projektu ZEVO záleží zejména na investorovi a konkrétních podmínkách, zda bude upřednostněna nižší cena tepla pro koncové zákazníky a vyšší cena za zpracování odpadu nebo naopak.

Graf na obr. 42 ukazuje výslednou závislost IRR pro koncept ZEVO a PK na kapacitě pro pět sítí CZT s rozdílnou poptávkou po teple. Uvažována je cena tepla na vstupu do CZT ve výši 280 Kč/GJ. Patrné je kapacitní omezení. U menších sítí CZT je kapacita ZEVO omezená shora nedosažením požadované účinnosti R1. Omezení kapacity zdola je zpravidla způsobeno příliš nízkým IRR z důvodu vysokých měrných nákladů na pokrytí zbytku poptávky po teple z PK.



Obr. 42: Závislost IRR na kapacitě ZEVO pro varianty velikosti CZT, cena tepla 280 Kč/GJ

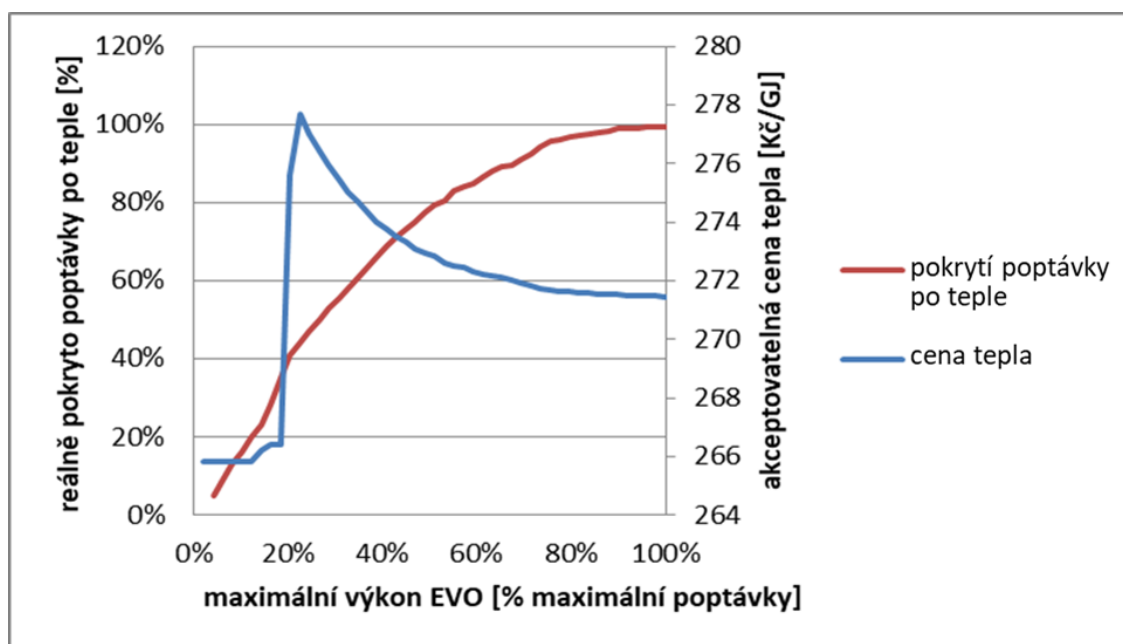
Minimální IRR kombinovaného zdroje ZEVO a PK závisí na požadavcích a typu investora. Pokud se jedná o municipální projekt, postačující IRR může být například 6 %, u soukromého investora lze očekávat minimální IRR vyšší. Je patrné, že do určité kapacity ZEVO nehraje velikost CZT velkou roli. U menších sítí CZT IRR s kapacitou sice prudce roste vlivem poklesu měrných investičních a provozních nákladů, ale než dosáhne přijatelné hodnoty, poklesne pod požadovanou úroveň naopak účinnost R1. U sítí CZT s roční poptávkou 300 TJ už účinnost R1 nabývá dostatečných hodnot pro celý rozsah posuzovaných kapacit. Obecně je z výsledků z využitých modelů patrné, že z hlediska maximální výnosnosti projektu je výhodnější vždy realizace maximální možné zpracovatelské kapacity, pokud je to umožněno splněním podmínky R1. Výnosnost projektu roste víceméně konstantně až do okamžiku, kdy je ze ZEVO pokryta téměř celá

poptávka po teple a při dalším zvyšování kapacity už není velký prostor pro úsporu variabilních nákladů PK. Doporučená kapacita se z tohoto pohledu jeví jako blízká se maximální, která je limitovaná faktorem R1, ovšem s dostatečnou rezervou.

Při vyšších cenách tepla na vstupu do sítě CZT překračující náklady na jeho výrobu v PK je možné dosáhnout vyšší výnosnosti projektu u větších sítí CZT. Pokud je cena tepla nižší, je důležitější vhodné dimenzování ZEVO a výnosnější může být při dané kapacitě ZEVO její realizace v menší síti CZT. Ve velkých sítích CZT a při nízkých cenách tepla tak může být projekt ZEVO nižší kapacity, například při snaze o maximální využití tepla i v letních měsících, nevýhodný.

Výsledky dále ukazují, že při odhadované ceně tepla 280 Kč/GJ na vstupu do sítě CZT je dosaženo výnosnosti na úrovni IRR = 6 % od kapacity 22-25 kt/rok podle velikosti sítě. Při uvažovaných předpokladech, dostatečné velikosti sítě CZT a ceně tepla 280 Kč/GJ lze dosáhnout u vyšších kapacit v rámci intervalu 10-60 kt/rok IRR až 15 %. Cena tepla má na hodnotu IRR významný vliv. Není možné konkrétně říci, o kolik se IRR změní při poklesu/zvýšení ceny tepla. To závisí na mnoha faktorech, ale obecně lze konstatovat, že na změnu ceny tepla jsou výrazně náchylnější projekty ZEVO ve větších sítích CZT a s nižší kapacitou, tedy i s nižším IRR. Při poklesu ceny tepla o 25 Kč/GJ dojde například u ZEVO s kapacitou 30 kt/rok a CZT s poptávkou 400 TJ/r k poklesu IRR o 2 % a u ZEVO s kapacitou 60 kt/rok v CZT s poptávkou 200 TJ/rok pouze o 0,6 %.

Obr. 43 ukazuje příklad výsledné ceny tepla na patě ZEVO ve vybrané lokalitě. Druhá křivka představuje procentuální pokrytí poptávky po teple v závislosti na maximálním výkonu ZEVO. Vynásobením hodnot těchto dvou křivek (v absolutních číslech) můžou být pro každou lokalitu vypočítány výnosy z prodeje tepla. Tento model tedy může být využíván jako pre-processing pro T-E modely ZEVO v případech, kdy je uvažováno s kompletním nahrazením původního tepelného zdroje.



Obr. 43: Model akceptovatelné ceny tepla ze ZEVO

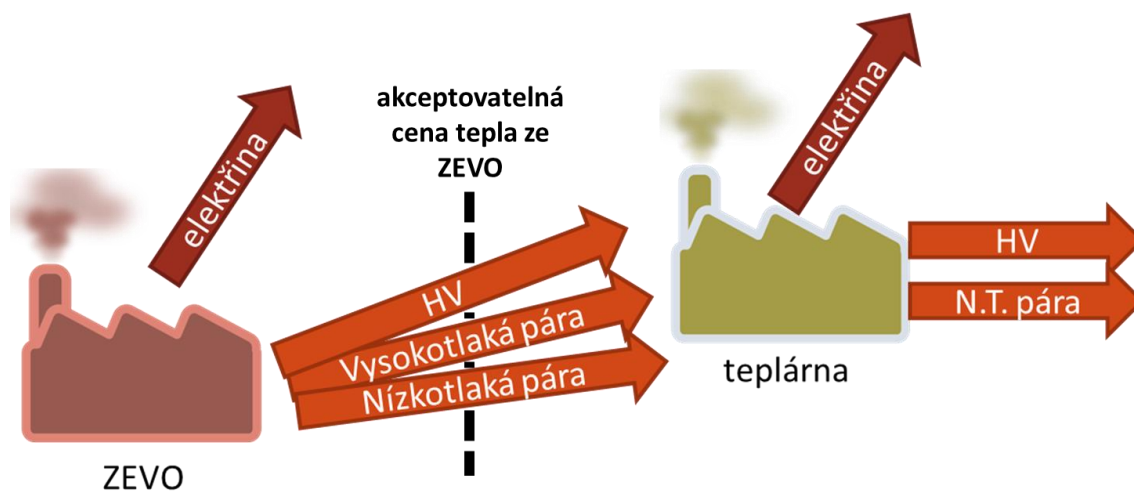
Z výsledků bylo zjištěno, že u většiny lokalit lze pozorovat skokový nárůst akceptovatelné ceny tepla při výkonu ZEVO odpovídajícímu kompletnímu pokrytí poptávky po teple mimo topnou sezónu. To je způsobeno možností dlouhodobé odstávky PK v tomto období, a tedy úsporou provozních nákladů.

Výsledky ukazují, že při uvažovaných vstupních datech, považovaných za reálná v podmínkách ČR, je náhrada původního tepelného zdroje ZEVO a PK ekonomicky udržitelná. Ekonomika těchto projektů je však silně závislá na ceně za zpracování odpadu, která je závislá na konkurenci v okolí a akceptovatelné ceně tepla. Ta zase závisí na limitní ceně pro koncové zákazníky, při jejímž překročení hrozí jejich odpojení od CZT a na nákladech na distribuci.

8.2 INTEGRACE ZEVO DO SÍTĚ CZT S EXISTUJÍCÍM TEPELNÝM ZDROJEM

Odhad uplatnitelného množství a akceptovatelné ceny tepla ze ZEVO se výrazně komplikuje, pokud má být jednotka integrována do sítě CZT, kam dodává teplo komplexnější tepelný zdroj, jakým je běžná teplárna nebo elektrárna. To je případ téměř všech větších sítí CZT na území ČR.

Předpokládá se, že veškeré teplo vyrobené v jednotce EVO je na různých úrovních vykupováno teplárnou, která je buď využívá (např. k výrobě elektřiny nebo pro technologické účely), nebo dále prodává do sítě CZT. ZEVO může disponovat vlastním turbogenerátorem. Tento princip je ilustrován na obr. 44.



Obr. 44: Princip výroby a dodávky energie pro model výpočtu ceny tepla

Nejprve byl autorem navržen přístup, na základě kterého byl vytvořen testovací model v MS Excel pro ověření metodiky. Ten byl následně rozvíjen v rámci projektu „Centrum kompetence pro energetické využití odpadů“⁷. Tento model pracoval na principu metody Monte Carlo založené na analýze výsledků, které vycházely z náhodně volených

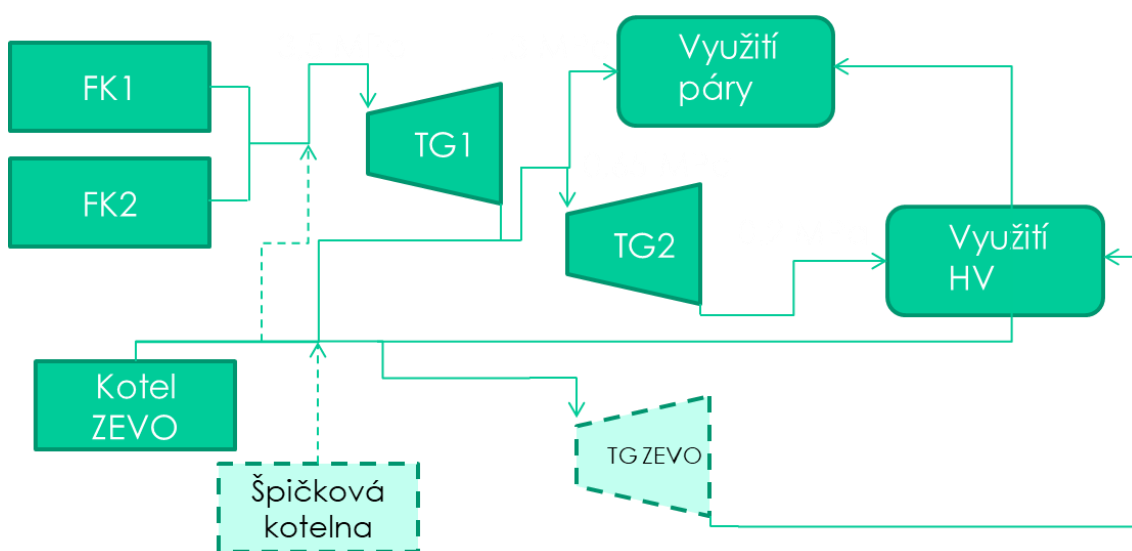
⁷ Výzkumný projekt "Waste-to-Energy (WtE) Competence Centre" (WtECC, č. TE02000236)

vstupních dat (výkon jednotlivých kotlů a energetické proudy). Následně bylo vybráno nejvhodnější řešení z pohledu ekonomiky, které splňovalo požadované podmínky.

Byla vytvořena počáteční verze modelu synergie ZEVO s dalším tepelným zdrojem v MS Excel pro ověření funkčnosti přístupu. Zatímco model v předchozí kapitole slouží pro stanovení ceny tepla v případě výstavby ZEVO a PK nahrazující původní zdroj tepla, tento model je využitelný i v případech, kdy je ZEVO realizováno u již existujícího a technologicky komplikovanějšího (více kotlů, využití páry v TG apod.) zařízení.

Jedná se o optimalizační model provozu několika tepelných zdrojů. V daném časovém intervalu je hledán režim provozu s nejnižšími provozními náklady a tedy nejvyšší možnou cenou tepla na patě ZEVO. Předpokladem je, že cena tepla na patě teplárny jako celku bude zachována. Na rozdíl od dříve prezentovaných verzí byl kladen důraz na univerzálnost a jednoduchou úpravu pro různé lokality.

Princip funkce modelu je na příkladu znázorněn na obr. 45. V tomto případě je modelován systém se čtyřmi kotli (včetně ZEVO a špičkové PK), třemi turbogenerátory a dvěma úrovněmi využití tepla. Eventuálně je možné modelovat systém s osmi jednotlivými kotli a třemi úrovněmi využití tepla. Každému bloku jsou přiřazeny příslušné parametry. Konkrétně u kotlů je to minimální a maximální výkon, možné využití výstupní páry a náklady na provoz. U turbogenerátorů linearizovaná funkce pro výpočet elektrického výkonu, omezení hltnosti a možné využití výstupní páry. U využití páry/horké vody potom minimální požadovaný výkon. Na základě těchto parametrů jsou v jazyce VBA vytvořeny okrajové podmínky výpočtu a formulována účelová funkce. Následně je pomocí řešitele nalezen ekonomicky optimální režim provozu.



Obr. 45: Blokové schéma vstupující do modelu synergie zařízení EVO s dalším tepelným zdrojem

Pozn.: FK – fluidní kotel

Výpočet je nejprve realizován bez ZEVO a poté se ZEVO. Ze vzniklé úspory provozních nákladů je vypočtena akceptovatelná cena tepla.

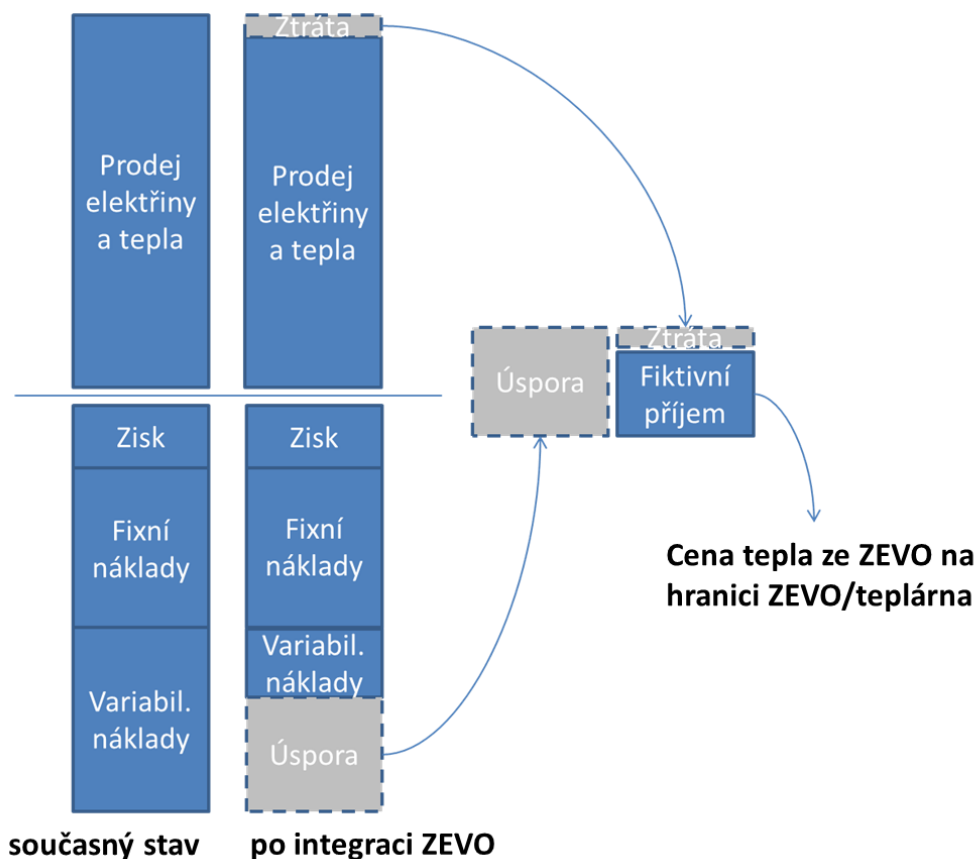
Tento model se ukázal jako funkční, nicméně odhalil některé nedostatky, například byl uvažován pouze na ohraničené časové úseky jednoho měsíce. Dále vznikla potřeba převedení modelu do optimalizačního softwaru GAMS z důvodu obtížné řešitelnosti v MS Excel v případě většího počtu kotlů a turbín. V další fázi bylo také vytvořeno rozhraní pro jednodušší zadávání okrajových podmínek. Vlastní implementace nástroje do softwaru GAMS nebyla předmětem dizertační práce.

8.2.1 Příklad stanovení ceny tepla a nalezení optimálního režimu provozu v konkrétní lokalitě

Byl vytvořen T-E model teplárny na měsíční bázi, jehož cílem bylo stanovení výrobních ukazatelů a jejich změn v důsledku integrace ZEVO a dále odhad parametrů klíčových pro ekonomiku ZEVO při zohlednění změny výrobních ukazatelů teplárny. Technická část modelu slouží pro výpočet spotřeby paliva a množství vyrobené elektřiny a tepla, resp. změn ve výrobě v důsledku integrace EVO. Tyto údaje dále vstupují do ekonomické části modelu. Cílem je provést výpočet ceny tepla z jednotky EVO tak, aby byla pro teplárnu zachována současná ziskovost resp. finanční tok. Výpočet výroby energie a spotřeby paliva dále probíhá iteračním způsobem.

Výrobní ukazatele z technické části modelu jsou využity pro ekonomickou bilanci. Hlavním cílem je stanovení výnosů a fixních a variabilních nákladů. Model předpokládá, že roční výnosy se shodují s náklady (navýšené o fiktivní náklad – zisk).

V první fázi je modelován současný stav a předpokládá se tedy pokrytí celé poptávky po teple z teplárny nebo jiného existujícího tepelného zdroje. V dalším kroku je uvažováno pokrytí části poptávky po páře a horké vodě z jednotky EVO v různých variantách. V důsledku nižší výroby elektrické energie teplárnou po integraci ZEVO může dojít k částečnému poklesu příjmů. Na druhou stranu však dojde k úspoře variabilních nákladů samotné teplárny. Výsledkem rozdílu této úspory a ztráty je částka, která slouží k fiktivnímu nákupu tepla z jednotky EVO za předpokladu, že je zachován zisk teplárny. Nakupována je buď pára, která je využita k výrobě elektřiny v rámci teplárny, anebo pára nebo horká voda přímo k využití v síti CZT. Tímto způsobem je stanovena cena tepla z jednotky EVO, která je akceptovatelná pro teplárnu. Princip výpočtu je znázorněn na obr. 46.



Obr. 46 Princip výpočtu ceny tepla z jednotky EVO

Při posuzování synergie jednotky EVO a teplárny byl využit obdobný model jako v případě samostatné teplárny, který umožňuje modelovat různé varianty toků páry v zařízení. V rámci jednotlivých variant, kapacit ZEVO a měsíců jsou modelovány různé režimy provozu, které se liší například ročním obdobím, poměrem pokrytí poptávky po páře jednotkou EVO nebo teplárnou apod. Cílem výpočtu bylo najít pro každý měsíc a kapacitu takový režim provozu, při kterém existuje maximální výnos jednotky EVO při celkovém zachování ekonomiky výroby tepla v teplárně. Tento výnos je tvořen prodejem elektřiny (v případě vlastní turbíny) a tepla teplárně. V rámci výnosů z prodeje tepla je tedy již zahrnuta cena tepla, která zajišťuje zachování zisku teplárny dle výše uvedeného postupu.

Ze série výpočtů provedených autorem lze uvést některé obecně platné závěry. Zásadní vliv na výslednou cenu tepla má primární palivo v původním zdroji. Z hlediska ekonomiky ZEVO je nejvhodnější (částečné) nahrazení zdroje spalujícího zemní plyn, kde hrají roli vysoké provozní náklady na palivo, a tedy je zde i potenciál vyšší finanční úspory. V místě předání konečnému odběrateli nelze pozorovat vliv převládajícího paliva na cenu tepla, což může být způsobeno rozsáhlejší sítí CZT – plynovými zdroji jsou často malé lokální výtopny a kotelny. V tab. 5 jsou shrnuty jednotlivé složky nákladů na výrobu tepla a porovnány hnědouhelné zdroje a zdroje na zemní plyn.

Je zřejmé, že hlavní složkou ceny tepla jsou v obou případech náklady na palivo, avšak u zemního plynu je tato položka výrazně vyšší. Zdroj [40] také srovnává průměrné náklady za GJ tepla pro konečného spotřebitele. Dle [70] byla v roce 2017 průměrná cena tepla ze

sekundárních rozvodů 562 Kč/GJ v případě výroby převážně z uhlí a 602 Kč/GJ ze zemního plynu. Provedená analýza ukazuje také rozdíly v ceně tepla v závislosti na instalovaném tepelném výkonu. Ten byl rozdělen do čtyř kategorií podle vyhlášky č. 415/2012 Sb. [19]. Nejvyšší cenu tepla lze očekávat u provozoven s instalovaným výkonem do 1 MW_t, a to 612 Kč/GJ, od 1 MW_t do 5 MW_t potom 578 Kč/GJ, od 5 MW_t do 50 MW_t 570 Kč/GJ a nejnižší cena je dosažena u provozoven nad 50 MW_t, 505 Kč/GJ.

Tab. 5 Podíl jednotlivých nákladů na ceně tepla bez DPH [40]

Palivo	Náklady na palivo	Elektrická energie	Technologická voda	Ostatní proměnné náklady	Mzdy a zákonné pojištění
Zemní plyn	67,6 %	3,4 %	0,3 %	0,2 %	4,8 %
Hnědé uhlí	38,1 %	5,7 %	1,0 %	3,2 %	8,5 %
	Oprava a údržba	Odpisy	Výrobní režie	Správní režie	Ostatní stálé náklady
Zemní plyn	4,1 %	10,3 %	3,6 %	4,0 %	1,7 %
Hnědé uhlí	9,8 %	15,2 %	5,6 %	8,3 %	4,6 %

8.3 ÚSPORA CO₂ VLIVEM NÁHRADY TEPLA V CZT ZE ZEVO

Metodika popsána v kap. 8.2 byla dále rozvinuta s cílem vyhodnotit úsporu produkce skleníkových plynů při integraci ZEVO do existující sítě CZT. Optimalizační model byl tak vedle minimalizace provozních nákladů souboru ZEVO + teplárna rozšířen také o minimalizaci emisí CO₂eq. Jedná se tedy o multikriteriální optimalizaci, která bude popsána níže v této kapitole.

8.3.1 Analýza

Byla provedena analýza, kolik CO₂ se v posuzovaných lokalitách, které byly identifikovány jako potenciálně vhodné pro výstavbu ZEVO (viz kap. 6), uspoří při nahrazení části tepla dodávaného do sítě CZT ze ZEVO. Nejprve bylo nutné odhadnout, jakým způsobem bude ovlivněn provoz stávajících zdrojů, pokud ZEVO částečně pokryje poptávku po teple. Za tímto účelem byly lokality rozděleny do tří skupin:

1. lokality s čistě výtopenskou výrobou tepla,
2. lokality s teplárenskou výrobou tepla,

3. lokality využívající odpadní teplo z elektráren.

U lokalit s výtopenskou výrobou tepla, tedy bez výroby elektřiny, bylo uvažováno, že při pokrytí části poptávky po teple o toto množství úměrně poklesne dodávka tepla z výtopy. Po vydělení uvažovanou účinností výroby tepla ve výtopně je výsledkem úspora energetického vstupu ve formě paliva. Účinnost byla pro výtopy na základě dokumentu [93] uvažována souhrnně ve výši 87,5 %. Tato hodnota odpovídá medianu účinnosti teplárenských a výtopenských kotlů.

Komplikovanější je situace v lokalitách, kde je teplo vyráběno v teplárnách, tedy zařízeních využívajících KVET. Zde byl dle [93] median účinnosti výroby tepla pouze na úrovni 41,7 %. Úspora paliva na jednotku nahrazeného tepla byla tedy výrazně vyšší než v případě výtopen. Dalším efektem snížení výkonu tepláren v důsledku náhrady tepla ze ZEVO bylo zároveň snížení výroby elektřiny, které bylo uvažováno ve stejném poměru jako snížení exportovaného tepla. Účinnost výroby elektřiny byla uvažována 16,2 % [93].

Poslední skupinou byly lokality využívající odpadní teplo z elektráren. Na rozdíl od tepláren bylo uvažováno, že provoz elektráren je ekonomicky založen na výrobě elektřiny a při poklesu poptávky po teple v důsledku náhrady části tepla ze ZEVO nedojde ke snížení jejich výkonu, k úspoře paliva a tedy i přímému snížení produkce CO₂. Na druhou stranu bylo předpokládáno, že je teplo z elektráren exportováno ve formě páry, která je buď dodávána přímo koncovým odběratelům, nebo slouží k ohřevu horké vody. Tato pára může být při poklesu poptávky po teple využita pro kondenzační výrobu elektřiny, což představuje benefit z hlediska úspory CO₂. Bylo uvažováno, že kondenzační elektřina je v lokalitách s dodávkou tepla z elektráren vyráběna s účinností 20 %.

Ve výsledku náhrada tepla ze ZEVO v lokalitách s dodávkou tepla z výtopen souvisí s úsporou CO₂ v důsledku náhrady primárních paliv, v lokalitách s dodávkou tepla z tepláren navíc s navýšením produkce CO₂ kvůli nevyrobené kogenerační elektřině a v lokalitách s dodávkou tepla z elektráren s úsporou CO₂ díky zvýšení výroby elektřiny. Úspora primárních paliv a případné zvýšení/snížení výroby elektřiny je v jednotlivých lokalitách vztažena na jednotku nahrazeného tepla. Dále byl proveden přepočít na úsporu CO₂, přičemž byl zohledněn palivový mix v jednotlivých lokalitách, který byl získán z dat ERÚ. Emisní faktory pro jednotlivá paliva byly uvažovány na základě [94]. U elektřiny byl uvažován český energetický mix, který odpovídá hodnotě 1.01 t CO₂/MWh.

Jak je uvedeno výše, úspora CO₂ v posuzovaných lokalitách je vztažena na jednotku nahrazeného tepla v síti CZT. Aby bylo možné dát tuto úsporu do vztahu s navrhovanou kapacitou ZEVO, byla v každé lokalitě s využitím T-E modelu stanovena závislost množství ročně nahrazeného tepla postupem dle kap. 7.1 na kapacitě zařízení. Konečným výsledkem je tedy množství uspořené CO₂ v důsledku náhrady tepla v síti CZT pro každou lokalitu a hodnocený rozsah zpracovatelských kapacit.

Z pohledu investorů do potenciálního projektu ZEVO se jeví jako zásadní odhadnout dostatečně přesně ekonomiku tohoto zařízení s ohledem na lokální podmínky. S tím souvisí analýza možných rizik, která by mohla ohrozit udržitelnost projektu. Jak z hlediska ekonomiky, tak i dosažení požadované energetické účinnosti R1, se v klimatických podmínkách střední Evropy jeví jako klíčové uplatnit dostatečné množství tepla vyrobeného v těchto zařízeních. Dokument [95] uvádí, že asi 75 % ZEVO, která

poskytla příslušná data, se orientovalo buď čistě na výrobu tepelné energie, nebo na kogenerační výrobu elektřiny a tepla.

8.3.2 Cíle

V souvislosti s cíli Evropské Unie dramaticky snížit množství skládkovaných KO do roku 2030 [96] je pravděpodobné, že zejména v zemích s méně rozvinutým systémem OH dojde k výstavbě nových ZEVO. Tam, kde je to možné, tak dává využití jejich odpadního tepla (např. pro účely CZT) ekonomický smysl, jelikož to umožní úsporu variabilních nákladů na vytápění. Studie [97] představuje KO jako primární zdroj energie pro centrální vytápění, který má potenciál částečně nahradit fosilní zdroje.

Kromě ekonomických aspektů jsou však poslední dobou diskutovány také environmentální dopady EVO, konkrétně GWP. Jak bude popsáno dále, EVO má díky odklonu biologicky rozložitelných složek odpadu od skládkování a náhradě primární energie potenciál mít z hlediska GWP pozitivní přínos. V publikaci [98] je popsána souvislost ekonomických i environmentálních dopadů EVO formou celkových nákladů na odstranění určitého množství CO_2eq . Optimalizační výpočet byl prováděn souhrnně pro území celé České republiky a klíčové parametry v jednotlivých lokalitách uvažovaných pro výstavbu ZEVO tak byly uvažovány pouze okrajově. Náhrada tepla ze ZEVO v lokalitách s dodávkou tepla z výtopen obecně souvisí s úsporou CO_2 v důsledku náhrady primárních paliv. V lokalitách s dodávkou tepla z tepláren navíc s navýšením produkce CO_2 kvůli nevyrobené kogenerační elektřině a v lokalitách s dodávkou tepla z elektráren s úsporou CO_2 díky zvýšení výroby elektřiny [99].

Při prováděných změnách v sítích CZT (jako např. výstavba ZEVO) zůstává výzvou minimalizace dopadů na životní prostředí při zachování ekonomické udržitelnosti projektu. Autor představuje metodiku, která umožňuje tato dvě kritéria vybalancovat při posuzování konkrétní lokality. Obdobným způsobem by bylo možné postupovat například i v případě hodnocení vlivu výstavby ZEVO na produkci vzdušných polutantů. Mezní náklady ZEVO zohledňující účinnost odstranění polutantů ze spalín jsou řešeny v [100].

8.3.3 Metodika

Je představen multikriteriální optimalizační nástroj, který umožňuje zohlednění jak ekonomického, tak environmentálního hlediska v konkrétní lokalitě. Těmito dvěma kritériím je přitom možné přikládat ve výpočtu libovolnou váhu. Nástroj je založen na předpokladu, že režim provozu všech prvků (zdroje tepla a turbíny) integrované v rámci jedné sítě CZT se může lišit v závislosti na tom, zda je optimální z hlediska ekonomiky nebo z hlediska minimalizace produkce CO_2eq . Popsaná metodika byla autorem publikována v impaktovaném časopisu [101].

Metodika optimalizace z hlediska ekonomiky a následný odhad dodávky tepla ze ZEVO a stanovení jeho akceptovatelné ceny byla podrobněji představena v [102]. Principem bylo provedení optimalizačního výpočtu ve dvou fázích, jehož výsledkem byla akceptovatelná cena tepla a jeho množství při integraci ZEVO. Původní model byl následně rozšířen o optimalizaci z hlediska minimalizace GWP. Za tímto účelem musela být provedena analýza bilance skleníkových plynů ze spalování primárních paliv

v teplárně, ze spalování odpadu a z výroby elektřiny. Vzhledem k faktu, že posouzení GWP zde předpokládá srovnání vzhledem k výchozímu stavu, dodávka tepla pro koncové spotřebitele mohla být zanedbána.

Produkce skleníkových plynů z teplárny

U každého z kotlů je navíc uvažována měrná produkce CO₂ vztažená na jednotku tepelného výkonu, která vychází z prvkového složení paliva a účinnosti kotle. Emisní faktory pro běžně využívaná fosilní paliva v teplárnách jsou uvedeny v [103]. V zásadě zde platí pravidlo, že spalování paliv s vyššími variabilními náklady (zemní plyn) vykazuje nižší produkci CO₂. Kromě fosilních paliv je možné uvažovat také spalování biomasy. Obvykle se bere v úvahu předpoklad, že stejné množství CO₂, které vznikne spálením biomasy, je biomasou absorbováno během růstu (fotosyntéza). Z toho vyplývá, že emisní faktor CO₂eq lze považovat za nulový, i když při samotném spalovacím procesu emise CO₂ vznikají.

Produkce skleníkových plynů ze spalování odpadu

Při integraci ZEVO bylo samozřejmě nutné vyhodnotit GWP při spalování KO. To je možné rozdělit do tří složek. První je vznik CO₂ při samotném spalování. Zde záleží na lokálním složení SKO a obsahu uhlíku. Autor [104] uvádí produkci přibližně 1 t CO₂/t SKO. Stejně jako v případě biomasy je nutné vzít v úvahu, že určitá část SKO je biologicky rozložitelná a částečně se tedy jedná o obnovitelný zdroj energie [105]. V modelu je tedy uvažována hodnota 0,4 t CO₂eq./t SKO. Druhou složkou jsou negativní emise CO₂eq. v důsledku odklonu SKO od skládkování, které je považováno za výchozí řešení. V článku [98] byly rozděleny skládky na území ČR do několika skupin v závislosti na kapacitě a stupni zachytu a využití skládkového plynu. Emise vzniklé skládkováním byly odhadnuty v intervalu 0-1.1 t CO₂eq./t SKO. Pro účely modelu se počítalo s průměrnou hodnotou, což je cca 0,2 t CO₂eq./t SKO, která vychází z průměrného zastoupení sledovaných parametrů skládek v ČR. Poslední složkou jsou emise z dopravy odpadu. Autoři [6] uvádějí, že vliv dopravy odpadu je z hlediska GWP minimální a proto nebyl brán v potaz. Celkové emise vzniklé spalováním odpadu se zohledněním jeho odklonu od skládkování byly tedy stanoveny na 0,2 t CO₂eq./t SKO.

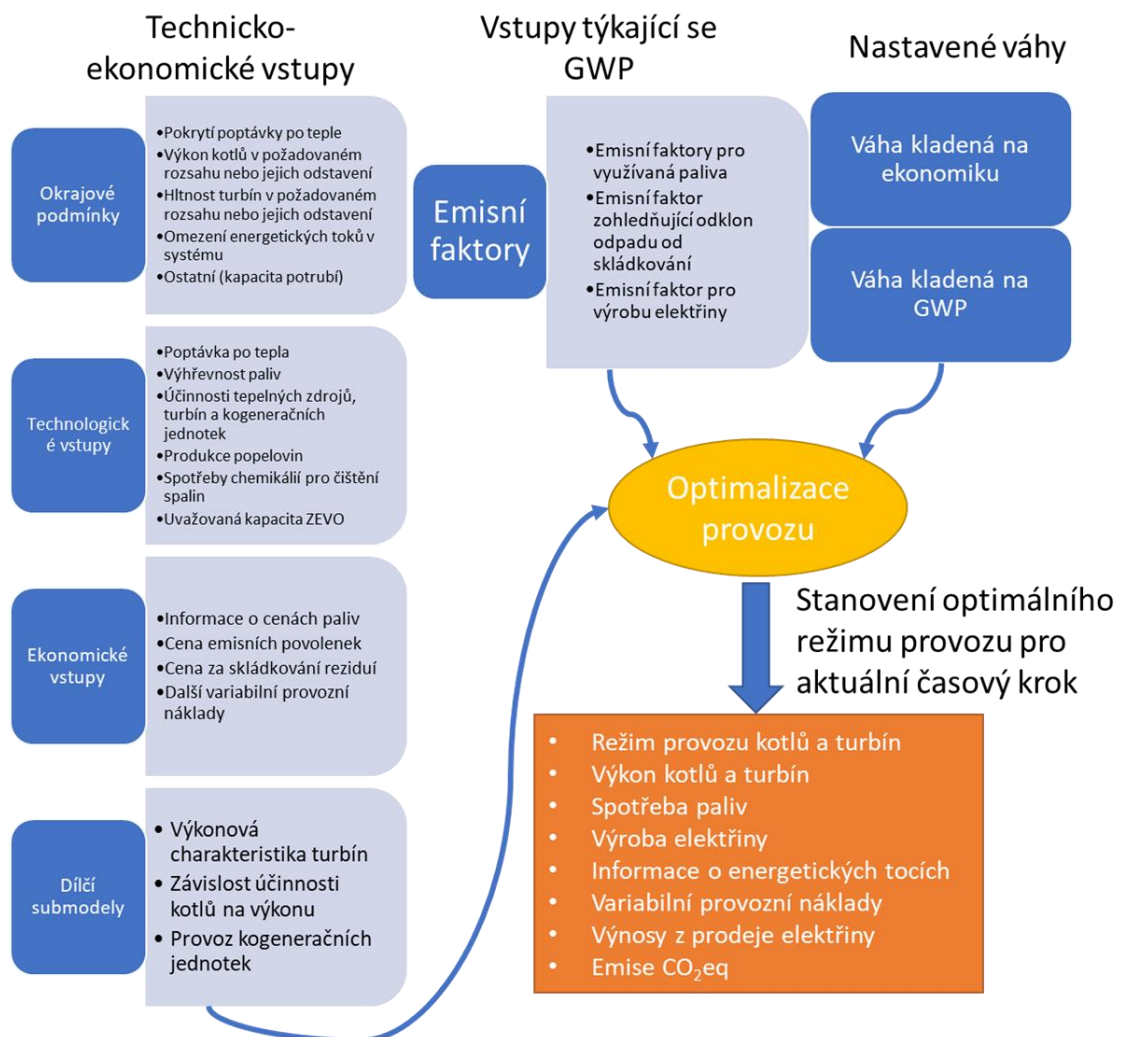
Úspora skleníkových plynů z výroby elektřiny

Vyrobena elektřina je v modelu reprezentována negativními emisemi CO₂eq. Tato elektřina de facto nahrazuje elektřinu vyrobenou v průměrném zdroji. Existuje více možností, jak k tomuto problému přistoupit. Pro tento článek byl využit český energetický mix. Kumulativní emisní faktory pro energetický mix v ČR uvažované v práci jsou uvedeny v [106]. Bylo uvažováno, že vyrobením jedné MWh elektřiny dojde k náhradě 1.01 t CO₂eq.

8.3.4 Matematický model

Představený matematický model se zaměřuje na teplárenské provozy a integraci ZEVO do jejich systémů. Model pracuje na denní bázi, což se v tomto případě jeví jako nejvhodnější varianta (viz kap. 7.1). Poskytuje akceptovatelnou výpočtovou náročnost za předpokladu dostatečné přesnosti, viz [107] a kap. 8.2. Schéma vstupů a výstupů modelu

je na obr. 47. Do modelu vstupují data týkající se existující technologie, dále emisní faktory využívaných paliv a jsou nastaveny váhy přiřkládané ekonomickému a environmentálnímu hledisku. Následně proběhne pro každý časový krok optimalizační výpočet, jehož výstupem je provozní režim jednotlivých prvků technologie a jsou vyčísleny hlavní výkonové a ekonomické parametry. Tato data jsou následně zpracována v postprocessingu, kde jsou vybrány možné provozní režimy tak, aby byla zajištěna minimální požadovaná doba provozu nebo odstávky kotlů, pokud je to vyžadováno. Model je detailně popsán dále v této kapitole.



Obr. 47 Schéma vstupů a výstupů optimalizačního modelu

Model vychází ze tří základních částí. Jedná se o spalovací kotle, turbogenerátory a CZT. Každé části je v modelu věnována patřičná pozornost v podobě několika základních vztahů.

V případě kotlů jde především o výpočet výkonu. Je nutné stanovit jeho maximální a minimální hodnotu. Do uživatelského rozhraní modelu je nutné zadat maximální a minimální hmotnostní tok páry, její požadovanou teplotu a tlak, vlastní spotřebu kotle a parametry napájecí vody. Z těchto parametrů lze pro každý kotel jednoznačně určit výkonový rozsah. Společně s cenou paliva lze také určit cenu za vyrobenou energii a stejně tak množství produkovaných emisí. Základní vztahy pro model mají tedy tvar:

$$\theta_{i,t}^B \cdot v_{min,i}^B \leq v_{i,t,r}^B \leq v_{max,i}^B \cdot \theta_{i,t}^B, \quad (7)$$

$$n_{var,i,t,r} = \varphi_{var,i,r} \cdot v_{i,t,r}^B, \quad (8)$$

$$m_{CO2,i,t,r} = \gamma_{CO2,i} \cdot v_{i,t,r}^B, \quad (9)$$

kde $v_{i,t,r}^B$ symbolizuje tepelný výkon i -tého kotle v roce r a dni t , $v_{min,i}^B$, $v_{max,i}^B$ definují jeho minimální a maximální hodnotu. $\theta_{i,t}^B$ jsou pomocné binární proměnné, které definují, zda je kotel v provozu nebo je odstavený. $\varphi_{var,i,r}$ jsou náklady na jednotku tepelné energie, $n_{var,i,t,r}$ jsou celkové variabilní náklady, $m_{CO2,i,t}$ definuje celkové množství CO_2 produkovaného kotlem i za den t a $\gamma_{CO2,i}$ je emisní faktor, viz [103].

U turbogenerátorů je potřeba zadat jejich hltnost, výkonnostní křivku a jejich účinnost. Popis je pak možný pomocí vztahů

$$P_{el,j,t,r}^{TG} = a_{1,j} \cdot P_{thin,j,t,r}^{TG} + a_{2,j} \cdot \theta_{j,t,r}^{TG}, \quad (10)$$

$$P_{thout,j,t,r}^{TG} = P_{thin,j,t,r}^{TG} - \frac{P_{el,j,t,r}^{TG}}{\eta_j^{TG}}, \quad (11)$$

$$r_{j,t,r} = P_{el,j,t,r}^{TG} \cdot \varphi_{el,r}, \quad (12)$$

$$m_{CO2,t,r} = \varepsilon_{CO2} \cdot \sum_j P_{el,j,t,r}^{TG}, \quad (13)$$

kde $P_{el,j,t,r}^{TG}$ je elektrický výkon j -tého turbogenerátoru, $a_{1,j}$, $a_{2,j}$ jsou regresní koeficienty získané analýzou výkonnostní křivky a $P_{thin,j,t,r}^{TG}$ je vstupující tepelný výkon. $\theta_{j,t,r}^{TG}$ opět vystupuje jako binární proměnná definující situace odstávky/provozu. $P_{thout,j,t,r}^{TG}$ je výstupní tepelný výkon za turbogenerátorem, η_j^{TG} je jeho elektromechanická účinnost a $\varphi_{el,r}$ prodejní cena elektřiny (včetně případných zelených bonusů). ε_{CO2} je koeficient pro energetický mix zmíněný výše a $m_{CO2,t,r}$ je úspora emisí spojená s výrobou elektřiny.

Popsaný přístup lze použít pouze v případě, že se jedná o PT. Pro kondenzační dvoustupňovou nebo vícestupňovou turbínu je potřeba tento přístup aplikovat na každý stupeň zvlášť. Zjednodušeně řečeno se z pohledu modelu jedná o několik PT za sebou. Ty jsou propojeny jednou proměnnou, která definuje, zda jsou všechny v provozu, případně odstavené.

Poslední základní částí je poptávka po teple. Je nutné zajistit, aby poptávka byla rovna, případně nižší než množství vyrobeného tepla. Jedná se tedy o jednoduchou nerovnost

$$d_{k,t,r}^D \leq \sum_j y_{j,k,t,r}^{TG} + \sum_i y_{i,k,t,r}^B, \quad (14)$$

kde $d_{k,t,r}^D$ je poptávka po teple do k -tého CZT v roce r ve dne t a $y_{j,k,t,r}^{TG}, y_{i,k,t,r}^B$ je množství páry jdoucí do daného CZT z turbín či kotlů.

Jako základ byla použita data na měsíční bázi. Na základě dostupných dat na denní bázi byla analyzována odchylka denních průměrů od měsíčních. Ukázalo se, že tato odchylka vykazuje známky normality. V případě, kdy jsou dostupná data na měsíční bázi, nástroj je schopen hodnoty poptávky na bázi denní vygenerovat.

Výpočet se snaží popsat situaci současného provozu tepelného zařízení, které zajišťuje poptávku po teple do CZT. Následně se věnuje situaci, kdy by k tepelnému zařízení bylo přistavěno ZEVO. Výpočet se dle předchozích vět dá rozdělit do dvou separátních částí.

První část se věnuje samostatně stojícímu tepelnému zařízení. V závislosti na vlastnostech kotlů, turbín a definované poptávce po teple se spočítají roční variabilní náklady n_r a roční produkce CO₂ $m_{CO_2,r}$

$$n_r = \sum_t \left(\sum_i n_{var,i,t,r} - r_{j,t,r} \right), \quad (15)$$

$$m_{CO_2,r} = \sum_t \left(\sum_i m_{CO_2,i,t,r} - m_{CO_2,t,r} \right). \quad (16)$$

Celý provoz lze optimalizovat z finančního nebo emisního hlediska. Podle zaměření se pak mění účelová funkce a výsledkem jsou minimální náklady na provoz, případně minimální produkce CO₂. Existují situace, kdy se nelze zaměřit čistě jenom na jedno kritérium. Proto je v modelu věnována pozornost problematice vícekritériální optimalizace. Ta dává dohromady jak ekonomiku, tak i emise. Logicky se nabízí přeformulovat účelovou funkci do podoby

$$b_n \cdot n_r + b_p \cdot m_{CO_2,r}, \quad (17)$$

kde koeficienty b_n, b_p určují důraz na náklady a emise CO₂eq. Problém je v tom, že hodnoty n_r a $m_{CO_2,r}$ se mohou řádově lišit, proto je potřeba je normovat. Navržený přístup využívá hodnot z předchozích výpočtů, kde byl kladen důraz vždy pouze na jedno kritérium. Účelová funkce přechází do tvaru.

$$b_n \cdot \frac{n_r}{n_{min,r}} + b_p \cdot \frac{m_{CO_2,r}}{m_{CO_2,min,r}}, \quad (18)$$

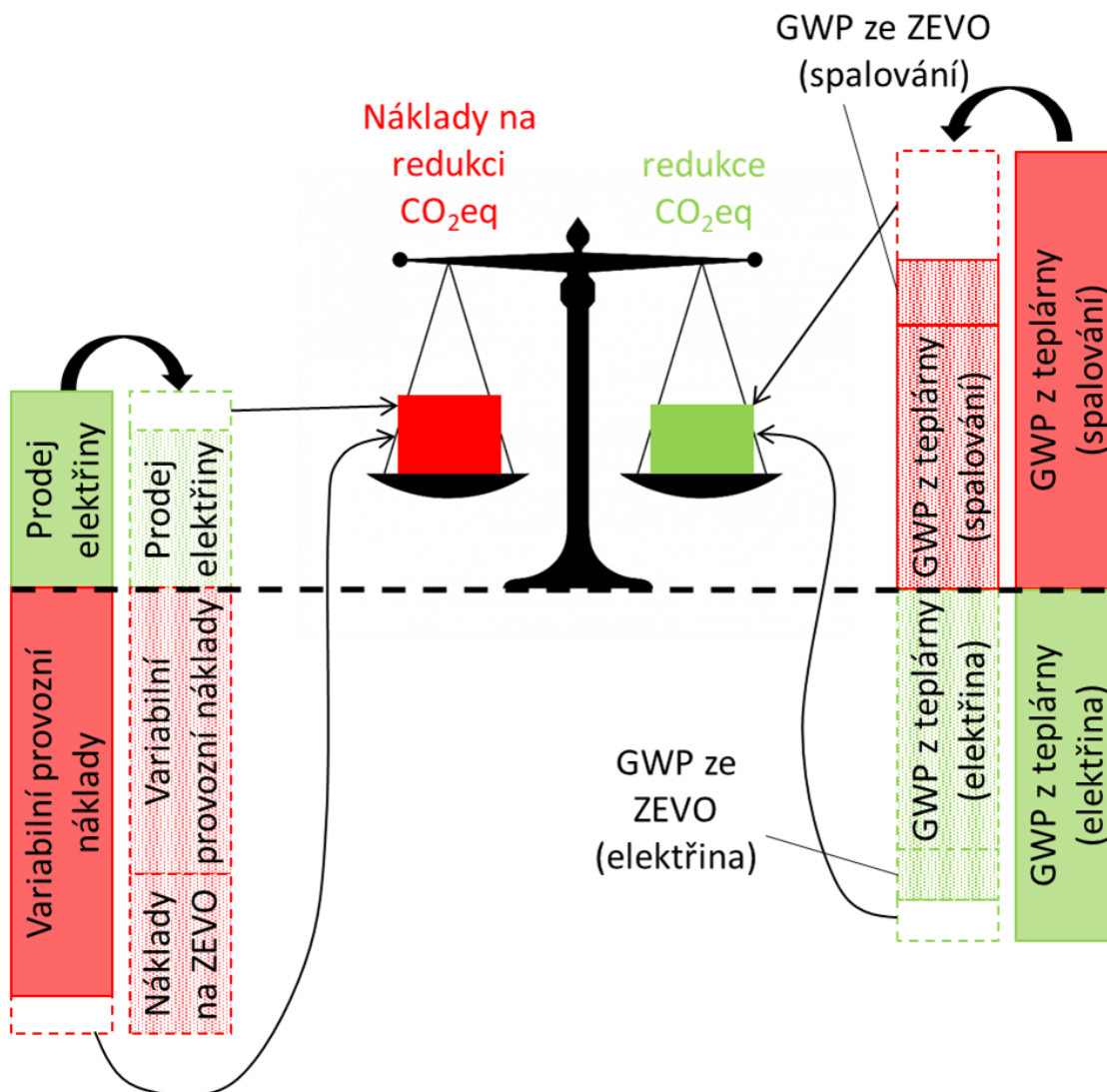
kde $n_{min,r}$, $m_{CO_2_{min},r}$ definují minimální hodnotu nákladů na provoz ($b_n = 1, b_p = 0$), emisí CO₂ ($b_n = 0, b_p = 1$).

V druhé části se do modelu zahrne výpočet ZEVO. Kotel ZEVO je uvažován jako další virtuální kotel s nulovými provozními náklady. Velikost kotle je odvozena ze zvolené kapacity ZEVO. V zadání turbogenerátoru ZEVO není rozdíl oproti teplárně. Jediný problém tkví v odhadu regresních koeficientů $a_{1,j}, a_{2,j}$. Ty jsou odhadnuty na základě návrhových specifikací od nejmenovaných firem. Výsledkem druhé části jsou opět variabilní náklady n_r^{EVO} a CO₂ produkce $m_{CO_2,r}^{EVO}$. Rozdíl

$$n_r - n_r^{EVO} \quad (19)$$

definuje příjmy, které si může ZEVO nárokovat jako příjmy za prodej tepla a elektrické energie. Tato hodnota může být potom použita do modelu ekonomiky samotného ZEVO (investiční náklady, náklady spojené s provozem založené na výkonu kotlů a turbín). Výsledkem je pak výnosnost projektu ZEVO kvantifikována pomocí IRR. Stejně jako náklady, lze porovnávat i produkci CO₂.

Díky popsanému přístupu je možné určit snížení/zvýšení produkce CO₂ za předpokladu integrace ZEVO o zvolené kapacitě. Zároveň lze určit výnosnost této integrace v podobě IRR za předpokladu zachování ekonomické stability dosavadního teplárenského provozu. Pokud je podmínkou dosažení určité hodnoty IRR, pak lze vyjádřit dodatečné náklady potřebné pro provoz ZEVO. Ilustrace uvedeného přístupu je na obr. 48.



Obr. 48 Ilustrace principu multikriteriální optimalizace

8.3.5 Případová studie

Pro demonstraci funkce modelu byla provedena případová studie, ve které bylo uvažováno s výstavbou ZEVO s dodávkou tepla do existující sítě CZT, do které je v současné době dodáváno teplo teplárnou. Poptávka po teple v modelové lokalitě je celkem 693 TJ/rok. Teplo je dodáváno ve formě vysokotlaké a nízkotlaké páry a horké vody.

Současná teplárna využívá dva fluidní hnědouhelné kotle, každý s výkonem 36 MW_t a s variabilními provozními náklady 390 Kč/MWh vyrobeného tepla. Dále je zde instalován olejový kotel s výkonem 13 MW_t a náklady 990 Kč/MWh a špičkový a záložní plynový kotel s náklady 1270 Kč/MWh. K výrobě elektřiny slouží KOT se dvěma odběry o výkonu 47 MW_e. Pára na turbínu může být dodávána z uhelných kotlů nebo kotle olejového. Vysokotlaká pára pro koncové spotřebitele může být přímo dodávána ze všech kotlů. Nízkotlakou páru lze odebírat z prvního odběru turbíny. Horká voda může být ohřívána i párou odebranou druhým odběrem.

Z pohledu ekonomiky a GWP byla posuzována výstavba ZEVO s nízkou kapacitou (10-40 kt/rok) a s vyšší kapacitou (80-150 kt/rok).

Modelování současného stavu

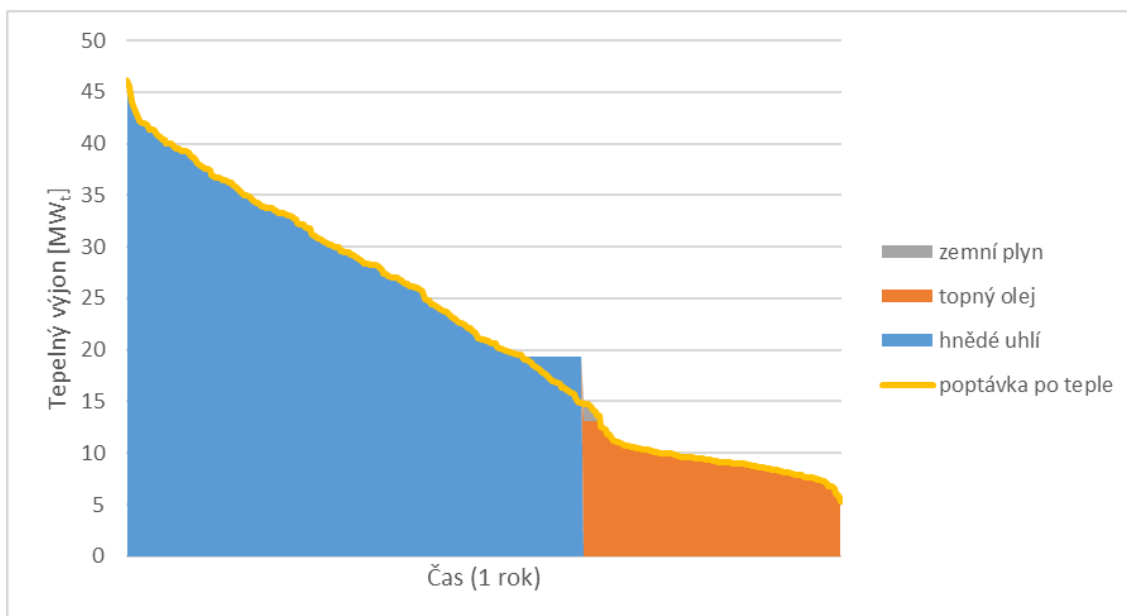
Tato kapitola se zabývá první částí modelu (samostatné teplárenské zařízení). Současný provoz lze analyzovat z pohledu ekonomiky, emisního zatížení nebo jejich kombinace. Kombinace byla definována pomocí koeficientů b_n , b_p . Hodnota se měnila po jedné desetině, za podmínky $b_n + b_p = 1$. Tab. 6 zobrazuje výsledky v podobě nákladů n_r a emisí $m_{CO_2,r}$.

Tab. 6 Variabilní náklady a emise CO₂ samostatně stojící teplárny

b_n	b_p	n_r [mil. Kč]	$m_{CO_2,r}$ [kt]	Náklady na úsporu CO ₂ [Kč/t]
1	0	98,6	100 822,7	0,0
0,9	0,1	99,6	90 263,9	97,5
0,8	0,2	101,9	84 158,7	195,0
0,7	0,3	103,3	81 978,7	247,5
0,6	0,4	103,8	81 426,9	270,0
0,5	0,5	105,5	80 558,9	340,0
0,4	0,6	108,0	79 584,1	442,5
0,3	0,7	127,2	75 298,3	1 120,0
0,2	0,8	276,9	46 372,9	3 275,0
0,1	0,9	276,9	46 372,9	3 275,0
0	1	276,9	46 372,9	3 275,0

Poslední sloupec vyjadřuje jednotkovou cenu za úsporu CO₂. Úspora se počítá od množství CO₂ při ekonomicky optimálním provozu. Cena narůstá zpočátku pozvolna a stejně tak pozvolna klesají emise. Je to způsobeno částečným nahrazováním uhelného kotle kotlem na kapalná paliva. Tato situace pokračuje až do maximálního výkonu kotle na kapalná paliva, pak se přidává i kotel na zemní plyn, viz obr. 49. Od $b_p = 0,7$ už není možno snižovat výkon uhelného kotle, tak je plně nahrazen kotlem na zemní plyn, který má podstatně vyšší provozní náklady.

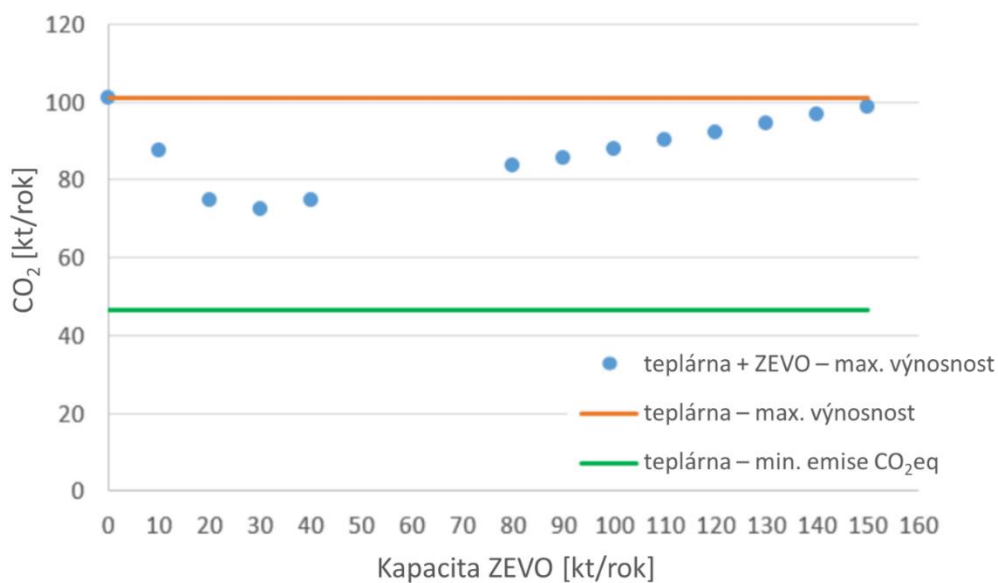
Průměrná cena emisní povolenky CO₂ v roce 2018 byla 399 Kč/t CO₂ [108]. Současná hodnota (leden 2020) emisní povolenky se už pohybuje kolem 600 Kč/t CO₂ [109]. Z dosavadních výsledků je zřejmé, že se stále více může vyplatit do jisté míry využívat dražší palivo i z ekonomického hlediska.



Obr. 49 Provoz kotlů teplárny při $b_n = 0,7$, $b_p = 0,5$ v průběhu roku

Modelování budoucího stavu

V druhé části modelu už se uvažuje s integrací ZEVO v rozmezí zvolených kapacit. Koeficient produkce CO_2 $\gamma_{\text{CO}_2,i}$ pro kotel ZEVO je samozřejmě nižší, než u kotlů na primární paliva. Pokud tedy bude tepelný výkon ze ZEVO sloužit z větší části jako náhrada tepelného výkonu z původní teplárny, pak dojde ke snížení produkce emisí. Porovnání produkce emisí se samostatně stojící teplárnou zobrazuje obr. 50. Oranžová čára přitom znázorňuje teplárnu při ekonomicky optimálním provozu, kdy jsou využívány zejména fluidní kotle a zelená čára teplárnu provozovanou při minimálních emisích CO_2 , tedy s využitím plynového kotle. Jedná se tedy o ekonomicky nejvýhodnější provoz.



Obr. 50 Emise CO_2 pro různé režimy provozu

Nejvyšší úsporu emisí poskytuje za daných podmínek ZEVO s kapacitou 30 kt/rok. To, zda se projekt vyplatí i z ekonomického hlediska sumarizuje tab. 7 pomocí kritéria IRR. U kapacity 80 kt/rok dosahovalo IRR tak nízké hodnoty, že nebylo nalezeno.

Tab. 7 Výnosnost projektů ZEVO v závislosti na kapacitě

Kapacita ZEVO [kt/rok]	IRR [%]	$p_{CO_2,r}$ [kt/rok]
10	3,1	87,6
20	11,5	74,9
30	14,0	72,5
40	13,9	74,7
80	záporné	83,5
90	0,6	85,7
100	1,0	87,9
110	1,4	90,1
120	1,8	92,3
130	2,1	94,5
140	2,4	96,7
150	2,6	98,9

Postačující hodnota IRR je stanovována investorem. Pro požadavek IRR = 10% není potřeba ZEVO o kapacitách 20-40 kt/rok nijak dotovat. Teplárna si zachová dosavadní zisky a ještě sníží emise. Ve většině případů platí, že pokud ZEVO vychází dobře z hlediska IRR, tak bude vycházet dobře i z hlediska emisí. Je to dáno tím, že ZEVO nahradí velkou část tepelného výkonu, takže teplárna dosáhne významných úspor v rámci spotřeby paliv, s čímž souvisí i pokles produkce CO₂. Pokud by byla požadována hodnota IRR = 15%, pak by musela teplárna část svého zisku věnovat na podporu ZEVO, viz tab. 8. Tabulka ilustruje zvýšené náklady teplárny přepočtené na jednotku úsporeného CO₂.

Tab. 8 Náklady na úsporu CO₂

Kapacita ZEVO [kt/rok]	Úspora CO ₂ [kt/rok]	Náklady na úsporu CO ₂ [Kč/t]
20	26,0	343
30	28,3	127
40	26,1	190

Pro tři ekonomicky i ekologicky nejlepší varianty byla spočítána nutná dotace ZEVO tak, aby dosáhlo $IRR = 15\%$. Dotace se dá vyjádřit jako dodatečné náklady na úsporu CO_2 .

Jako nejvhodnější se z hlediska výnosnosti i redukce CO_2 jevila kapacita 30 kt/rok. Při zachování dosavadní ekonomiky teplárny bylo IRR této kapacity rovno 14%. Navíc za první rok provozu došlo celkově k úspoře přes 28 kt/ CO_2 .

9 SHRnutí

Pracoviště ÚPI dlouhodobě vyvíjí optimalizační nástroje pro hodnocení investičních záměrů ZEVO. Vlastní výpočtové jádro ve formě matematického modelu vyžaduje jako vstup rozsáhlou datovou základnu. V tomto kontextu je cílem dizertační práce příprava vybraných vstupů ve formě původních T-E modelů, které odrážejí potřebu zohlednit různou úroveň detailu, dostupnost dat a časovou náročnost vlastního výpočtu.

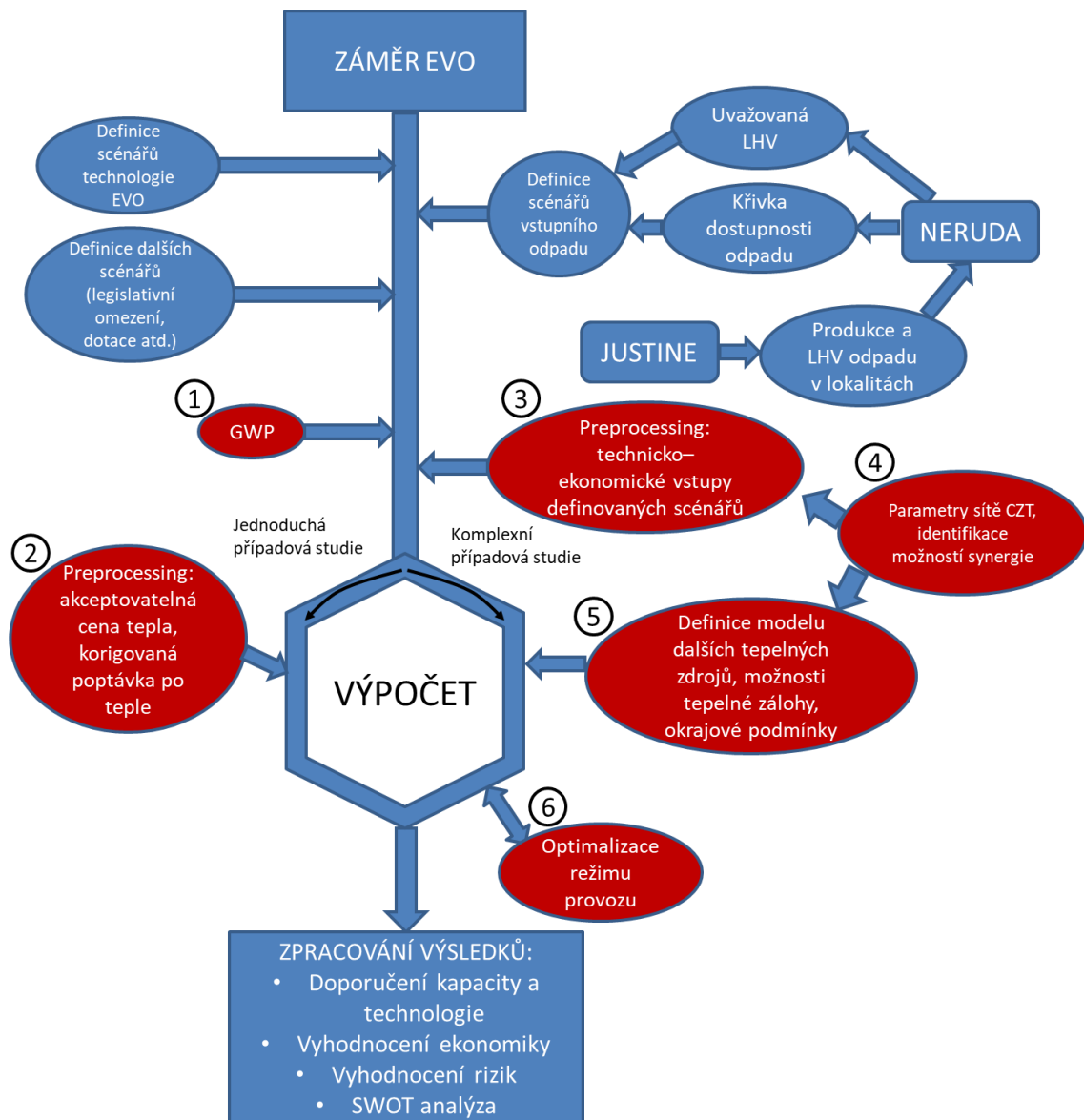
Vzhledem k faktu, že dodávka tepla ze ZEVO a jeho cena představuje zásadní parametr pro udržitelnost budoucích projektů, zaměřuje se práce především na problematiku integrace EVO do sítě CZT.

Obr. 51 schematicky ilustruje náplň dizertační práce v kontextu optimalizačních nástrojů využívaných pro plánování OH, jejichž finálním výstupem je komplexní nástroj pro návrh parametrů ZEVO s využitím scénářového přístupu. Červeně je zvýrazněno šest oblastí, na kterých se autor přímo podílel, modře pak vstupní a výstupní data, která jsou vytvořena, respektive zpracována na pracovišti ÚPI.

V počáteční fázi jsou definovány scénáře vstupních parametrů (okrajové podmínky výpočtu). S využitím nástrojů *NERUDA* a *JUSTINE* je pro danou lokalitu vytvořena tzv. „křivka dostupnosti odpadu“, která ukazuje závislost mezi maximální cenou na bráně a množstvím odpadu a dále je proveden odhad LHV.

Následně jsou do modelu načtena vstupní data, se kterými souvisí potenciál synergie s případným dalším tepelným zdrojem v lokalitě. Samotný výpočet je možné rozdělit na dvě varianty:

- i. **Jednoduchá případová studie (Simple case study)** – tento způsob výpočtu je možné aplikovat buď v lokalitě s jednoduchým výtopenkým nebo teplárenským zdrojem, kde nepřipadá v úvahu významnější možnost technologické synergie (např. využití turbíny). V tomto případě je v pre-processingu odhadnuta akceptovatelná cena tepla, která v zásadě odpovídá variabilním nákladům na jeho výrobu v původním zdroji a korigovaná poptávka po teple, která zohledňuje krátkodobé výkyvy. Následně je proveden výpočet scénářů na měsíční bázi.
- ii. **Komplexní případ (Complex-case study)** – v případě, že je možné využít synergie mezi původním tepelným zdrojem tepla a zařízením EVO, případně je původní zdroj komplikovanější, např. využívá více kotlů s různými parametry, je nutné zvolit přístup, při kterém je do optimalizačního modelu zahrnut i tento zdroj.



Obr. 51: Schéma scénářového přístupu pro návrh ZEVO v lokalitě s dalším tepelným zdrojem se zvýrazněným modelů, které jsou cílem práce

V rámci řešení práce byly zpracovány následující oblasti. U každého bodu je uveden okruh dle obr. 51, pod který příslušný bod spadá.

- Problematika CZT
 - Přehled existujících sítí CZT na území ČR včetně sumarizace dostupných parametrů (oblast 4)
 - Analýza vlivu použité úrovně časového detailu poptávky po teple na přesnost výpočtu požadované ceny na bráně. Hlavním přínosem je dosažení uspokojivé přesnosti při využití dat na měsíční bázi s využitím koeficientů zohledňujících nerovnoměrnost poptávky po teple. (oblast 3)
 - Rozšíření současné datové základny týkající se sítí CZT na území ČR včetně prognóz do budoucna týkající se jejich struktury, dodávek tepla a tepelných zdrojů (oblast 4)
- Dílčí T-E modely

- Vytvoření předběžného optimalizačního modelu záloh pro případ výpadku dodávky tepla (oblast 5)
- Posouzení vlivu akumulace na dodávku tepla ze ZEVO (oblast 3)
- Návrh metodiky korekce měsíčních dat ve vybraných režimech – zohlednění nerovnoměrností v poptávce po teple (oblast 2 a 3)
- Optimalizace akumulace tepla pro účely jeho dodávky z jednotky EVO (oblast 2 a 6)
- Optimalizační modely integrace ZEVO do existující sítě CZT
 - Výpočet ceny tepla na patě zdroje (oblast 2 a 6)
 - Posouzení vlivu různých parametrů na akceptovatelnou cenu tepla, což slouží pro její odhad v lokalitách s nedostatkem informací pro její exaktní stanovení (oblast 2).
 - Vytvoření nástroje pro optimalizaci provozu více zdrojů tepla (včetně ZEVO) v rámci jedné sítě CZT (oblast 6).
 - Zahnutí problematiky GWP do optimalizačních výpočtů integrace ZEVO (oblast 1 a 6).
 - Implementace výstupů z vytvořených modelů do komplexních optimalizačních nástrojů

Co se týče přidané hodnoty pro potenciální zákazníky, představená metodika nabízí možnost komplexního posouzení integrace ZEVO, případně jiných strategických rozhodnutí v rámci teplárenských sítí. Proti běžně využívaným postupům jsou zohledněny parametry existujících zdrojů tepla a fluktuace v poptávce po teple a je tak dosaženo vyšší přesnosti odhadu ekonomiky plánovaných investic. Díky univerzálnosti a flexibilitě vytvořeného optimalizačního modelu je možné jej po drobných úpravách a naplnění vstupními daty využít pro hodnocení téměř jakékoliv sítě CZT a vzájemně porovnat velké množství možných variant.

Kromě ekonomického vyhodnocení disponuje model možností navrhnout takovou strategii budoucího provozování sítě CZT, která je zároveň vhodná z hlediska GWP. V neposlední řadě slouží výstupy z matematických modelů vytvořených autorem ke zvýšení přesnosti logistické optimalizační úlohy NERUDA (viz kap. 4.1), která je dále využitelná např. jako pomůcka při rozhodování o vhodných parametrech nebo způsobu provozování ZEVO, dále také pro orgány státní správy pro podporu klíčových rozhodnutí nebo při vytváření strategických dokumentů, jako je např. POH.

9.1 BUDOUCÍ PRÁCE

Stěžejním prvkem dizertační práce bylo vytvoření komplexního optimalizačního nástroje pro modelování teplárenských zdrojů. Jeho hlavním cílem je ekonomické a environmentální posouzení investic v této oblasti, jako je například integrace ZEVO, při současném zohlednění základních parametrů všech kotlů a parních turbín v rámci sítě CZT. Do budoucna je dále plánován rozvoj dílčích submodelů a rozšíření o nové, jako je model kogeneračních jednotek, plynových turbín nebo multipalivové kotle. Co se týče samotného optimalizačního modelu, počítá se se zvyšováním úrovně automatizace a flexibility, aby byla umožněna jeho snadná aplikace na v podstatě jakoukoliv technologii. Dále je řešen problém minimální doby provozu a odstávky kotlů, což s sebou nese nutnost

propojení jednotlivých časových kroků výpočtu. V neposlední řadě je plánováno zahrnutí legislativních aspektů, především problematiky emisních povolenek a zelených bonusů.

PŘEHLED PUBLIKACÍ

2014

PUTNA, O.; KROPÁČ, J.; FRÝBA, L.; PAVLAS, M. Prediction of Heating Value of Waste and Its Importance for Conceptual Development of New Waste-to- Energy Plants. In Proceedings of the 17th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2014. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. Milano, Italy: Aidic Servizi S.r.l., 2014. s. 1273-1278. ISBN: 978-88-95608-30- 3. ISSN: 2283- 9216.

ŠOMPLÁK, R.; PAVLAS, M.; KROPÁČ, J.; PUTNA, O.; PROCHÁZKA, V. Logistic model-based tool for policy- making towards sustainable waste management. Clean Technologies and Environmental Policy, 2014, roč. 16, č. 10098, s. 1275-1286. ISSN: 1618- 954X.

2015

ZAVÍRALOVÁ, L.; ŠOMPLÁK, R.; PAVLAS, M.; KROPÁČ, J.; POPELA, P.; PUTNA, O.; GREGOR, J. Computational system for simulation and forecasting in waste management incomplete data problem. In Proceedings of the 18th International Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES 2015). CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. Miláno, Itálie: Aidic Servizi Srl, 2015. s. 763-768. ISBN: 978-88-95608-36- 5. ISSN: 2283-9216.

TOUŠ, M.; PAVLAS, M.; PUTNA, O.; STEHLÍK, P.; CRHA, L. Combined heat and power production planning in a waste-to-energy plant on a short- term basis. Energy, 2015, č. 90, s. 137-147. ISSN: 0360- 5442.

PUTNA, O.; KROPÁČ, J.; ŠOMPLÁK, R.; PAVLAS, M.; STEHLÍK, P. Studie možností energetického využití odpadů. Brno. 2015. p. 1 - 79.

PAVLAS, M.; ŠOMPLÁK, R.; KROPÁČ, J.; FERDAN, T.; PUTNA, O.; GREGOR, J.; BÉBAR, L. Příprava podkladů pro oblast podpory odpadového hospodářství 2014 až 2020. 2015. p. 1 - 250.

2016

JANOŠŤÁK, F., PAVLAS M., PUTNA O., ŠOMPLÁK R., POPELA P. Heuristic approximation and optimization for waste-to-energy capacity expansion problem. In: Mendel 2016.

GREGOR, J.; PUTNA, O.; FERDAN, T.; KROPÁČ, J.; ŠOMPLÁK, R.; PAVLAS, M.; STEHLÍK, P. Study on waste collection area proposal. 2016.

PAVLAS, M.; PUTNA, O.; KROPÁČ, J.; STEHLÍK, P. Complex approach towards the assessment of waste-to-energy plants' future potential. In Thomé-Kozmiensky, K. J., Thiel, S. (Eds.): Waste Management, Volume 6, Waste-to- Energy. Neuruppin, Germany: TK Verlag Karl Thomé- Kozmiensky, 2016. s. 149-160. ISBN: 978-3-944310-29- 9.

2017

ŠYC, M.; GREGOR, J.; KROPÁČ, J.; PUTNA, O.; PAVLAS, M.; STEHLÍK, P. Material recovery of waste – technology and products utilization. 2017.1

PUTNA, O.; JANOŠŤÁK, F.; ŠOMPLÁK, R.; PAVLAS, M. Short-time Fluctuations and their Impact on Waste-to-Energy Conceptual Design Optimised by Multi-stage Stochastic Model. In Chemical engineering transactions. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. 2017. s. 955-960. ISBN: 978-88-95608-51- 8. ISSN: 2283-9216.

KROPÁČ, J.; PUTNA, O.; PAVLAS, M. Limity energetického využití odpadu s nižší výhřevností. Odpady, 2017, č. 2017/ 4, s. 21-23. ISSN: 1210-4922.

KROPÁČ, J.; PUTNA, O.; PAVLAS, M. Limity energetického využití odpadu s nižší výhřevností. Energie- 21, 2017, č. 2017/ 3, s. 28-31. ISSN: 1803-0394.

2018

PUTNA, O.; JANOŠŤÁK, F.; PAVLAS, M. Modelling of Existing Heating Plant Replacement with a Waste to Energy Plant and a Peak-Load Natural Gas Boiler. In Chemical Engineering Transactions. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. Milano, Italy: Aidic Servizi Srl, 2018. s. 1615-1620. ISBN: 978-88-95608-67-9. ISSN: 2283-9216.

PUTNA, O.; JANOŠŤÁK, F.; ŠOMPLÁK, R.; PAVLAS, M. Demand modelling in district heating systems within the conceptual design of a waste-to-energy plant. Energy, 2018, č. 163, s. 1125-1139. ISSN: 0360-5442.

PUTNA, O.; JANOŠŤÁK, F.; PAVLAS, M.; STEHLÍK, P. Integration of WtE plant into energy producing system. 2018.

2019

NEVRLÝ, V.; ŠOMPLÁK, R.; PUTNA, O.; PAVLAS, M. Location of mixed municipal waste treatment facilities: Cost of reducing greenhouse gas emissions. Journal of Cleaner Production, 2019, roč. 239, č. 1, s. 118003.1-118003.11. ISSN: 0959-6526.

JANOŠŤÁK, F.; PUTNA, O.; PAVLAS, M. Energy Dispatch Model for Integrated Waste-to-Energy Plant. Chemical Engineering Transactions, 2019, roč. 76, č. 1, s. 1435-1440. ISSN: 2283-9216.

PUTNA, O.; JANOŠŤÁK, F.; PAVLAS, M. Greenhouse Gas Credits from Integrated Waste-to-Energy Plant. Book of abstracts. Proceedings of SDEWES 2017 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environmental Systems. Záhřeb, Chorvatsko: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, 2019. s. 1-11. ISSN: 1847-7178.

2020

PUTNA, O., JANOŠŤÁK, F., PAVLAS, M. Greenhouse gas credits from integrated waste-to-energy plant. Journal of Cleaner Production. 2020, roč. 270, s. 122408. ISSN 0959-6526.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EDWARDS, Joel, Maazuz OTHMAN, Enda CROSSIN a Stewart BURN. Life cycle inventory and mass-balance of municipal food waste management systems: Decision support methods beyond the waste hierarchy. *Waste Management* [online]. 2017, 69, 577–591. ISSN 0956-053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2017.08.011
- [2] EU. *Směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 2008/98 ES ze dne 19. listopadu 2008 o odpadech a o zrušení některých směrnic*, Úřední věstník Evropské unie L 312/3. 2008
- [3] BOHM, Robert A., David H. FOLZ, Thomas C. KINNAMAN a Michael J. PODOLSKY. The costs of municipal waste and recycling programs. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2010, 54(11), 864–871. ISSN 0921-3449. Dostupné z: doi:10.1016/j.resconrec.2010.01.005
- [4] European Parliament. *Circular economy package, Four legislative proposals on waste* [online]. B.m.: EU Legislation in Progress. 2017. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/2018/2/Zprava-o-vyvoji-energetiky-v-oblasti-tepla-za-rok-2016.pdf>
- [5] BP. *BP Statistical Review of World Energy, 67th edition* [online]. 2018 [vid. 2019-03-02]. Dostupné z: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>
- [6] FERDAN, Tomáš, Martin PAVLAS, Vlastimír NEVRLÝ, Radovan ŠOMPLÁK a Petr STEHLÍK. Greenhouse gas emissions from thermal treatment of non-recyclable municipal waste. *Frontiers of Chemical Science and Engineering* [online]. 2018, 12(4), 815–831. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s11705-018-1761-4>
- [7] Ministerstvo průmyslu a obchodu. *Zpráva o vývoji energetiky v oblasti tepla za rok 2016*. 2017
- [8] CEWEP (Confederation of European Waste to Energy Plants). *High Quality Recycling goes Hand in Hand with Waste-to-Energy* [online]. 2014 [vid. 2016-07-27]. Dostupné z: <http://www.cewep.eu/information/recycling/index.html>
- [9] CAREY, Paul. Paradigm Shift in the British Waste Management Sector – from Landfilling to Incineration. In: *Planung und Umweltrecht*. B.m.: TK Verlag, 2014, s. 75–86.
- [10] ČR. *Plán odpadového hospodářství České republiky pro období 2015 – 2024*. listopad 2014

- [11] HAYES, Adam. Internal Rate of Return (IRR). *Investopedia* [online]. [vid. 2020-09-04]. Dostupné z: <https://www.investopedia.com/terms/i/irr.asp>
- [12] EU. *Směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 1999/31 ES ze dne 26. dubna 1999 o skládkách odpadů, Úřední věstník Evropské unie L 182*. 1999
- [13] KOTOULOVÁ, Zdenka. *Situační zpráva o biologicky rozložitelných komunálních odpadech v ČR*. B.m.: Sleeko, Praha. 2000
- [14] EU. *Směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 76/2000 ES ze dne 4. prosince 2000 o spalování odpadu, Úřední věstník Evropské unie L 332*. 2000
- [15] EU. *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2018/850 EU ze dne 30. května 2018, kterou se mění směrnice 1999/31/ES o skládkách odpadů, Úřední věstník Evropské unie L 150/100*. 2018
- [16] EU. *Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/851 ze dne 30. května 2018, kterou se mění směrnice 2008/98/ES o odpadech, Úřední věstník Evropské unie L 150/109*. 2018
- [17] EU. *Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/852 ze dne 30. května 2018, kterou se mění směrnice 94/62/ES o obalech a obalových odpadech, Úřední věstník Evropské unie L 150/141*. 2018
- [18] ČR. *Nařízení vlády č. 352/2014 Sb. o Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015–2024 ze dne 31.12.2014*. 2014
- [19] ČR. *Vyhláška č. 415/2012 sb. ze dne 30.11.2012 o přípustné úrovni znečištění a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší*. 2012
- [20] ČR. *Zákon č. 201/2012 sb. ze dne 13.6.2012 o ochraně ovzduší*. 2012
- [21] ČR. *Zákon č. 100/2001 sb. ze dne 20.3.2001 o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů*. 2001
- [22] ČR. *Vyhláška č. 93/2016 sb. ze dne 1.4.2016 Katalog odpadů*. 2016
- [23] ČR. *Zákon č. 185/2001 sb. ze dne 14.6.2001 o odpadech a o změně některých dalších zákonů*. 2001
- [24] ŠOMPLÁK, Radovan, Vlastimír NEVRLÝ, Veronika SMEJKALOVÁ, Zlata ŠMÍDOVÁ a Martin PAVLAS. Bulky waste for energy recovery: Analysis of spatial distribution. *Energy* [online]. 2019, 181, 827–839. ISSN 0360-5442. Dostupné z: [doi:10.1016/j.energy.2019.05.175](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.175)
- [25] KROPÁČ, Jiří, Ondřej PUTNA a Martin PAVLAS. Limity energetického využití odpadu s nižší výhřevností. *Odpady*. 2017, 2017(4), 21–23. ISSN 1210-4922.

- [26] EKO-KOM. Rozbory odpadů. *Elektronický zpravodaj o odpadech pro města a obce*. 2017, (18), 2–3.
- [27] MANHART, Jaromír. Strategie odpadového hospodářství ČR Ministerstva životního prostředí. In: *Waste2Energy, AF POWER*. 2015.
- [28] REIMANN, Dieter O. *CEWEP Energy Report III (Status 2007-2010) - Results of Specific Data for Energy, R1 Plant Efficiency Factor and NCV of 314 European Waste-to-Energy (WtE) Plants*. 2012.
- [29] GROSSO, Mario, Astrid MOTTA a Lucia RIGAMONTI. Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive. *Waste Management* [online]. 2010, 30(7), IWWG Task Group on “Thermal Treatments” Special Thematic Issue “Thermal Treatment of Solid Waste”, 1238–1243. ISSN 0956-053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2010.02.036
- [30] ČEZ a.s. Co je ZEVO. *Skupina ČEZ* [online]. 2019 [vid. 2019-11-18]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/zevo/co-je-zevo.html>
- [31] Pražské služby, a.s. *Energetické využívání odpadů* [online]. 2018 [vid. 2019-11-18]. Dostupné z: <https://www.psas.cz/index.cfm/sluzby-firmam/zarizeni-pro-energeticke-vyuzivani-odpadu/energeticke-vyuzivani-odpadc5af/>
- [32] SAKO BRNO, a.s. Popis technologie. *Energetické využití odpadu* [online]. 2018 [vid. 2019-11-18]. Dostupné z: <https://www.sako.cz/pro-brnaky/cz/801/energeticke-vyuziti-odpadu/>
- [33] TERMIZO a.s. Technologie. *tmz.mvv.cz* [online]. 2019 [vid. 2019-11-18]. Dostupné z: <http://tmz.mvv.cz/technologie/>
- [34] MORAVEC, Jan. ZEVO Chotíkov - trnitá cesta moderní spalovny odpadů. *oEnergetice.cz* [online]. 2016 [vid. 2019-11-18]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/teplarenstvi/zevo-chotikov-trnita-cesta-moderni-spalovny-odpadu/>
- [35] PAVLAS, Martin, Radovan ŠOMPLÁK, Jiří KROPÁČ, Tomáš FERDAN, Ondřej PUTNA a Jiří GREGOR. *Příprava podkladů pro oblast podpory odpadového hospodářství 2014 až 2020*. 2015
- [36] ŠOMPLÁK, Radovan, Martin PAVLAS a Michal STIEBER. Příprava podkladů pro oblast podpory odpadového hospodářství 2014–2020, dokument „Návrh optimální sítě zařízení k nakládání s odpady v rámci celé ČR včetně stanovení potřebných kapacit těchto zařízení ve všech krajích“. *zadavatel: Ministerstvo životního prostředí ČR, subdodávka pro EY*. 2015.
- [37] ŠOMPLÁK, Radovan, Lenka ZAVÍRALOVÁ, Jiří KROPÁČ a Martin PAVLAS. *Justýna–nástroj pro odhad produkce a výhřevnosti komunálních odpadů na úrovni*

- mikroregionů. In: *Odpadové fórum 2015* [online]. 2015 [vid. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/TVIP2015/prispevky/017.pdf>
- [38] ROSADA, Janusz. Characteristics of district heating - advantages and disadvantages. *Energy and Buildings* [online]. 1988, 12(3), 163–171. ISSN 0378-7788. Dostupné z: doi:10.1016/0378-7788(88)90061-8
- [39] CONNOLLY, David, Brian Vad MATHIESEN, Poul Alberg ØSTERGAARD, Bernd MÖLLER, Steffen NIELSEN, Henrik LUND, Urban PERSSON, Sven WERNER, Jan GRÖZINGER, Thomas BOERMANS a OTHERS. *Heat Roadmap Europe 2* [online]. 2013 [vid. 2016-07-26]. Dostupné z: <http://www.forskningsdatabasen.dk/en/catalog/2186085842>
- [40] TSČR. Naše teplo. *Teplárenské sdružení České republiky* [online]. 2017 [vid. 2016-05-30]. Dostupné z: <http://www.naseteplo.cz/>
- [41] International Energy Agency. *Combined Heat and Power, Evaluating the benefits of greater global investment* [online]. 2008. Dostupné z: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/chp_report.pdf
- [42] BÄRNTHALER, Klaus a Josef LOIDL. Účinnost odsíření dosáhne v Elektrárně Tušimice II celých 98 %. *All for Power*. 2009, (4), 29–32.
- [43] EU. *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES ze dne 21. října 2009 o stanovení rámce pro určení požadavků na ekodesign výrobků spojených se spotřebou energie (přepřacování), Úřední věstník Evropské unie L 285/10*. 2009
- [44] EU. *Směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 2010/75 EU ze dne 24. listopadu 2010 o průmyslových emisích, Úřední věstník Evropské unie L 306*. 2010
- [45] Energo-Envi, S.R.O. Diverzifikace systémů CZT cesta k vyšší konkurenceschopnosti. *D2 Publikace, příručky a informační materiály v oblasti úspor energie státního programu EFEKT 2011* [online]. 2011 [vid. 2016-11-08]. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/decentralizace.pdf>
- [46] BAŠTA, Jiří, Karel BROŽ, Jiří CIKHART a Vladimír VALENTA. *Topenářská příručka, Svazek 2*. Praha: GAS s.r.o., 2001. ISBN 80-86176-83-5.
- [47] ŠOMPLÁK, Radovan, Martin PAVLAS, Jiří KROPÁČ, Ondřej PUTNA a Vít PROCHÁZKA. Logistic model-based tool for policy-making towards sustainable waste management. *Clean Technologies and Environmental Policy* [online]. 2014, 16(7), 1275–1286. ISSN 1275–1286 (2014). Dostupné z: doi:10.1007/s10098-014-0744-5
- [48] ŠOMPLÁK, Radovan. *Efektivní plánování investic do technologií pro energetické využití odpadů*. Brno, 2016. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.

- [49] ŠOMPLÁK, Radovan a Lenka ZAVÍRALOVÁ. Síťové úlohy v oblasti nakládání s odpadem. In: *62. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2015*. Praha: Česká společnost chemického inženýrství, 2015, s. 1–12.
- [50] PAVLAS, Martin. Waste Availability, Successful Regional Strategies and New WtE Projects Shaping – The Benefits and Application of The Optimization Tool NERUDA. In: *IRRC (International Recycling & Recovery Congress): TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky*. 2014, s. 139–150. ISBN 978-3-944310-15-2.
- [51] FERDAN, Tomáš. *Efektivní využití komunálních odpadů v energetice*. Brno, 2017. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
- [52] BĚBAR, Ladislav a Martin PAVLAS. Příprava podkladů pro oblast podpory odpadového hospodářství 2014–2020, dokument „Analýza a vyhodnocení možnosti aplikace nových technologií k energetickému využití odpadů“. *zadavatel: Ministerstvo životního prostředí ČR, subdodávka pro EY*. 2015.
- [53] VILLANI, Kenneth a Johan DE GREEF. Exploiting the Low-temperature End of WTE-Boilers. In: *Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste*. 2010.
- [54] International Solid Waste Association (ISWA). *Waste-to-Energy State of the Art Report, 6th Edition* [online]. 2012. Dostupné z: <http://www.cewep.eu/information/data/iswawtestateoftheartreport/index.html>
- [55] The European IPPC Bureau. *Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, Final Draft* [online]. 2018 [vid. 2019-03-03]. Dostupné z: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/WI/WI_BREF_FD_Black_Watermark.pdf
- [56] KROPÁČ, Jiří. *Pokročilý výpočtový nástroj pro návrh systému čištění spalin z procesu termického zpracování odpadů*. Brno, 2012. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.
- [57] POGGIO, A. a E. GRIECO. Influence of flue gas cleaning system on the energetic efficiency and on the economic performance of a WTE plant. *Waste Management* [online]. 2010, 30(7), IWWG Task Group on “Thermal Treatments” Special Thematic Issue “Thermal Treatment of Solid Waste”, 1355–1361. ISSN 0956-053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2009.09.008
- [58] ARENA, Umberto. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Management* [online]. 2012, 32(4), Solid Waste Gasification, 625–639. ISSN 0956-053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2011.09.025

- [59] ŠKORPÍK, Jiří. Tepelné turbíny a turbokompresory. *Transformační technologie* [online]. 2011, (2) [vid. 2016-07-13]. ISSN 1804-8293. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/tepelne-turbiny-a-turbokompresory.html>
- [60] KARAFIÁT, Josef a kol. *Sborník technických řešení zdrojů s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla*. Praha, Česká Republika: Ortep, s.r.o., 2006.
- [61] KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Kogenerační jednotky-zřizování a provoz*. B.m.: GAS, 2007.
- [62] ZHAO, Xin-gang, Gui-wu JIANG, Ang LI a Ling WANG. Economic analysis of waste-to-energy industry in China. *Waste Management* [online]. 2016, 48, 604–618. ISSN 0956-053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2015.10.014
- [63] SHIMBAR, Ali a Seyed Babak EBRAHIMI. The application of DNPV to unlock foreign direct investment in waste-to-energy in developing countries. *Energy* [online]. 2017, 132, 186–193. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2017.05.098
- [64] FERDAN, Tomáš, Radovan ŠOMPLÁK, Lenka ZAVÍRALOVÁ, Martin PAVLAS a Lukáš FRÝBA. A waste-to-energy project: A complex approach towards the assessment of investment risks. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2015, 89, 1127–1136. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.04.005
- [65] WEBER, Thomas A. On the (non-)equivalence of IRR and NPV. *Journal of Mathematical Economics* [online]. 2014, 52, 25–39. ISSN 0304-4068. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmateco.2014.03.006
- [66] UCEKAJ, Vladimír. *Analýza možností nakládání s komunálními odpady v rámci mikroregionu* [online]. Brno, 2010 [vid. 2016-07-26]. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/1328/teze.pdf?sequence=1>
- [67] PUTNA, Ondřej. *Uplatnění zařízení pro energetické využití odpadů malých zpracovatelských kapacit v podmínkách ČR*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D.
- [68] STEHLÍK, Petr. *Up-to-Date Waste-to-Energy Approach: From Idea to Industrial Application* [online]. Heidelberg, Germany: Springer, 2016. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, 8884. ISBN 978-3-319-15466-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-15467-1
- [69] TZB-INFO. *Vývoj vytápění za rok 2016 podle MPO* [online]. [vid. 2019-01-23]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/17049-vyvoj-vytapani-za-rok-2016-podle-mpo>

- [70] Energetický regulační úřad ČR. *Přehled cen tepelné energie v členění podle cenových lokalit* [online]. 2015 [vid. 2016-06-16]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/cs/teplo/statistika/prehled-cen-tepelne-energie-v-cleneni-podle-cenovych-lokalit>
- [71] ELLYIN, Claudine. *Small scale waste-to-energy technologies* [online]. B.m.: Columbia University. 2012. Dostupné z: http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Ellyin_Thesis.pdf
- [72] Český hydrometeorologický ústav. *EMIS, Zdroje znečišťování za rok 2016* [online]. 2017 [vid. 2019-01-23]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/plants/index_CZ.html
- [73] SALGADO, Fabricio a Pedro PEDRERO. Short-term operation planning on cogeneration systems: A survey. *Electric Power Systems Research* [online]. 2008, 78(5), 835–848. ISSN 0378-7796. Dostupné z: doi:10.1016/j.epsr.2007.06.001
- [74] TOUŠ, Michal, Martin PAVLAS, Ondřej PUTNA, Petr STEHLÍK a Lukáš CRHA. Combined heat and power production planning in a waste-to-energy plant on a short-term basis. *Energy* [online]. 2015, 90, Part 1, 137–147. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2015.05.077
- [75] ČR. *Vyhláška č. 194/2007 Sb. ze dne 31.7.2007, kterou se stanoví pravidla pro vytápění a dodávku teplé vody, měrné ukazatele spotřeby tepelné energie pro vytápění a pro přípravu teplé vody a požadavky na vybavení vnitřních tepelných zařízení budov přístroji regulujícími dodávku tepelné energie konečným spotřebitelům.* 2007
- [76] GOV.UK - Environment Agency and Department for Environment, Food & Rural Affairs. *Waste and recycling* [online]. únor 2014 [vid. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.gov.uk/government/policies/waste-and-recycling>
- [77] PUTNA, Ondřej, F. JANOSTAK, R. SOMPLAK a Martin PAVLAS. Short-time Fluctuations and Their Impact on Waste-to-Energy Conceptual Design Optimized by Multi-Stage Stochastic Model. *Chemical Engineering Transactions* [online]. 2017, 61, 955–960. Dostupné z: doi:10.3303/CET1761157
- [78] JANOŠŤÁK, František. *Modely toků v síti pro odpadové hospodářství.* Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D.
- [79] ŠOMPLÁK, Radovan. *Využití metod stochastického programování pro hodnocení investic v energetických zdrojích banoš.* Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce RNDr. Pavel Popela, Ph.D.
- [80] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle.* B.m.: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983.

- [81] Ernst & Young, s.r.o. *Začlenění parních turbín do zařízení pro energetické využití odpadu - Výzkumná zpráva, Centrum kompetence pro energetické využití odpadů – „WtE Competence Centre“*. 2016
- [82] MATUŠKA, Tomáš. Zásobníky tepla s řízeným teplotním vrstvením (stratifikací). *tzbinfo* [online]. 2011 [vid. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/156-zasobniky-tepla-s-rozenym-teplotnim-vrstvenim-stratifikaci>
- [83] BACHMAIER, Andreas, Sattaya NARMSARA, Jan-Bleicke EGGERS a Sebastian HERKEL. Spatial distribution of thermal energy storage systems in urban areas connected to district heating for grid balancing - A techno-economical optimization based on a case study. *Journal of Energy Storage* [online]. 2016 [vid. 2016-08-23]. ISSN 2352-152X. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2016.05.004
- [84] OLSTHOORN, Dave, Fariborz HAGHIGHAT a Parham A. MIRZAEI. Integration of storage and renewable energy into district heating systems: A review of modelling and optimization. *Solar Energy* [online]. 2016, 136, 49–64. ISSN 0038-092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2016.06.054
- [85] DIMOULKAS, Ilias a Mikael AMELIN. Monte Carlo simulation of district heating system short-term operation in electricity markets. *Energetika* [online]. 2017, 63(3) [vid. 2020-01-14]. ISSN 1822-8836, 0235-7208. Dostupné z: doi:10.6001/energetika.v63i3.3560
- [86] Teplárna Tábor, a.s. Využití akumulace tepla k navýšení výroby z KVET v Teplárně Tábor, a.s. *All for Power*. 2016, (3).
- [87] EGGLESTON, H.S., L. BUENDIA, K. MIWA, T NGARA a K. TANABE. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. B.m.: National Greenhouse Gas Inventories Programme. 2006
- [88] Institute for Energy Economics and Financial Analysis. *Europe's Coal-Fired Power Plants: Rough Times Ahead, Analysis of the Impact of a New Round of Pollution Controls* [online]. 2017. Dostupné z: www.ieefa.org
- [89] PANEPINTO, D. a M. C. ZANETTI. Municipal solid waste incineration plant: A multi-step approach to the evaluation of an energy-recovery configuration. *Waste Management* [online]. 2018, 73, 332–341. ISSN 0956-053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2017.07.036
- [90] Siemens s.r.o. *Studie - plynové kotelny, Sumarizace investičních a provozních nákladů plynových kotelen*. 2016
- [91] JANOŠŤÁK, František, Martin PAVLAS, Ondřej PUTNA, Radovan ŠOMPLÁK a Pavel POPELA. Heuristic Approximation and Optimization for Waste-to-Energy Capacity Expansion Problem. In: *Proceedings of 22nd International conference on Soft Computing, Mendel 2016*. 2016, s. 123–130. ISBN 1803-3814.

- [92] WAHLROOS, Mikko, Matti PÄRSSINEN, Jukka MANNER a Sanna SYRI. Utilizing data center waste heat in district heating – Impacts on energy efficiency and prospects for low-temperature district heating networks. *Energy* [online]. 2017, 140, 1228–1238. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2017.08.078
- [93] Vupek-Economy, s.r.o. *Možnosti růstu energetické účinnosti ve velkých výrobnách energie*. 2014
- [94] ČR. *Vyhláška č. 480/2012 Sb. ze dne 20.12.2012 o energetickém auditu, ve znění pozdějších předpisů*. 2012
- [95] ISWA. *Waste-to-Energy State-of-the-Art Report, 6th Edition* [online]. 2012 [vid. 2019-09-03]. Dostupné z: <http://www.iswa.org/media/publications/knowledge-base/>
- [96] *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 1999/31/EC on the landfill of waste* [online]. 2. prosinec 2015 [vid. 2019-04-12]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/ALL/?uri=CELEX:52015PC0594>
- [97] CONNOLLY, D., H. LUND, B. V. MATHIESEN, S. WERNER, B. MÖLLER, U. PERSSON, T. BOERMANS, D. TRIER, P. A. ØSTERGAARD a S. NIELSEN. Heat Roadmap Europe: Combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system. *Energy Policy* [online]. 2014, 65, 475–489. ISSN 0301-4215. Dostupné z: doi:10.1016/j.enpol.2013.10.035
- [98] NEVRLÝ, Vlastimír, Radovan ŠOMPLÁK, Ondřej PUTNA a Martin PAVLAS. Location of Mixed Municipal Waste Treatment Facilities: Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions. *Journal of Cleaner Production*. 2019, In press.
- [99] PAVLAS, Martin, Vlastimír NEVRLÝ, Ondřej PUTNA a Radovan ŠOMPLÁK. Cost of reducing greenhouse gas emissions from residual municipal waste treatment. In: *13th Conference on sustainable development of energy, water and environmental systems (SDEWES)*. 2018.
- [100] MARTINEZ-SANCHEZ, Veronica, Tore HULGAARD, Claus HINDSGAUL, Christian RIBER, Bettina KAMUK a Thomas F. ASTRUP. Estimation of marginal costs at existing waste treatment facilities. *Waste Management* [online]. 2016, 50, 364–375. ISSN 0956-053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2016.02.032
- [101] PUTNA, Ondřej, František JANOŠTÁK a Martin PAVLAS. Greenhouse gas credits from integrated waste-to-energy plant. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2020, 270, 122408. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2020.122408

- [102] JANOŠŤÁK, František, Ondřej PUTNA a Martin PAVLAS. Energy Dispatch Model for Integrated Waste-to-Energy Plant. *Chemical Engineering Transactions*. 2019, 76, 1435–1440.
- [103] JUHRICH, Kristina. *CO2 Emission Factors for Fossil Fuels* [online]. 30. září 2016 [vid. 2019-08-03]. Dostupné z: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2_emission_factors_for_fossil_fuels_correction.pdf
- [104] CHEN, Tsao-Chou a Cheng-Fang LIN. CO2 emission from municipal solid waste incinerator: IPCC formula estimation and flue gas measurement. *Sustainable Environment Research*. 2010, 20(1), 9–17.
- [105] POUR, Nasim, Paul A. WEBLEY a Peter J. COOK. Potential for using municipal solid waste as a resource for bioenergy with carbon capture and storage (BECCS). *International Journal of Greenhouse Gas Control* [online]. 2018, 68, 1–15. ISSN 1750-5836. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijggc.2017.11.007
- [106] OTE, a.s. *National Energy Mix* [online]. 2016 [vid. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz>
- [107] PUTNA, Ondřej, František JANOŠŤÁK, Radovan ŠOMPLÁK a Martin PAVLAS. Demand modelling in district heating systems within the conceptual design of a waste-to-energy plant. *Energy* [online]. 2018, 163, 1125–1139. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.059>
- [108] ERÚ (Energetický regulační úřad). *Průměrná cena emisní povolenky pro rok 2018* [online]. 2019 [vid. 2019-12-10]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/462920/prum_cena_emis_povol_2018.pdf/fb8e23ec-12e5-4b52-a7c3-63e86629a59e
- [109] GMBH, finanzen net. CO2 European Emission Allowances PRICE Today | CO2 European Emission Allowances Spot Price Chart | Live Price of CO2 European Emission Allowances per Ounce | Markets Insider. *markets.businessinsider.com* [online]. [vid. 2019-12-04]. Dostupné z: <https://markets.businessinsider.com/commodities/co2-european-emission-allowances>

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA 1: ODPADY VHODNÉ PRO ENERGETICKÉ VYUŽITÍ

Skupina	Podskupina	Název odpadu	Kód	Produkce v roce 2015	Energeticky využito v roce 2015	Skládkován o v roce 2015
Odpady z prvovýroby v zemědělství, zahradnictví, myslivosti, rybářství, lesnictví a z výroby a zpracování potravin	Odpady ze zemědělství, zahradnictví, rybářství, lesnictví a myslivosti	Odpad rostlinných pletiv	20103	45906	22%	0%
		Odpadní plasty (kromě obalů)	20104	5168	0%	98%
		Odpady z lesnictví	20107	6526	0%	0%
	Odpady z výroby a ze zpracování ovoce, zeleniny, obilovin, jedlých olejů, kaka, kávy, čaje a tabáku; odpady z konzervářského průmyslu z výroby droždí a kvasničného extraktu, z přípravy a kvašení melasy	Suroviny nevhodné ke spotřebě nebo zpracování	20304	46606	20%	11%
	Odpady z pekáren a výroby cukrovinek	Suroviny nevhodné ke spotřebě nebo zpracování	20601	16835	37%	4%
Odpady ze zpracování dřeva a výroby desek, nábytku, celulózy, papíru a lepenky	Odpady ze zpracování dřeva a výroby desek a nábytku	Odpadní kůra a korek	30101	3076	0%	0%
		Piliny, hobliny, odřezky, dřevo, dřevotřískové desky a dýhy, neuvedené pod číslem 03 01 04	30105	36260	6%	3%
	Odpady z výroby a zpracování celulózy, papíru a lepenky	Odpadní kůra a dřevo	30301	498	3%	0%
		Mechanicky oddělený výmět z rozvláknování odpadního papíru a lepenky	30307	14600	6%	31%
		Odpady ze třídění papíru a lepenky určené k recyklaci	30308	70255	0%	0%
Odpady z kožedělného,	Odpady z kožedělného a	Odpadní klišovka a štípenka	40101	180	28%	11%

kožešnického a textilního průmyslu	kožešnického průmyslu	Odpady z usní (odpadní holina, postružiny, odřezky, prach z broušení) obsahující chrom	40108	238	0%	38%
	Odpady z textilního průmyslu	Odpady z kompozitních tkanin (impregnované tkaniny, elastomer, plastomer)	40209	40059	35%	37%
		Odpady z nezpracovaných textilních vláken	40221	284	11%	63%
		Odpady ze zpracovaných textilních vláken	40222	41870	40%	24%
Odpady z organických chemických procesů	Odpady z výroby, zpracování, distribuce a používání plastů, syntetického kaučuku a syntetických vláken	Plastový odpad	70213	73705	15%	18%
Odpady z fotografického průmyslu	Odpady z fotografického průmyslu	Fotografický film a papír neobsahující stříbro nebo sloučeniny stříbra	90108	179	2%	31%
Odpady z tváření a z fyzikální a mechanické úpravy povrchu kovů a plastů	Odpady z tváření a z fyzikální a mechanické povrchové úpravy kovů a plastů	Plastové hobliny a třísky	12010 5	17752	10%	38%
Odpadní obaly, absorpční činidla, čisticí tkaniny, filtrační materiály a ochranné oděvy jinak neurčené	Obaly (včetně odděleně sbíraného komunálního obalového odpadu)	Papírové a lepenkové obaly	15010 1	582402	2%	0%
		Plastové obaly	15010 2	167876	2%	5%
		Dřevěné obaly	15010 3	54269	3%	1%
		Kompozitní obaly	15010 5	8620	5%	27%
		Směsné obaly	15010 6	102912	13%	62%
		Textilní obaly	15010 9	764	3%	49%

	Absorpční činidla, filtrační materiály, čisticí tkaniny a ochranné oděvy	Absorpční činidla, filtrační materiály, čisticí tkaniny a ochranné oděvy neuvedené pod číslem 15 02 02	150203	3098	10%	65%
Odpady v tomto katalogu jinak neurčené	Vyřazená vozidla (autovraky) z různých druhů dopravy (včetně stavebních strojů) a odpady z demontáže těchto vozidel a z jejich údržby (kromě odpadů uvedených ve skupinách 13, 14 a v podskupinách 16 06 a 16 08)	Plasty	160119	9536	2%	37%
		Odpady jinak blíže neurčené	160199	1113	13%	53%
Stavební a demoliční odpady (včetně vytěžené zeminy z kontaminovaných míst)	Dřevo, sklo a plasty	Dřevo	170201	45302	1%	9%
		Plasty	170203	8366	3%	70%
	Asfaltové směsi, dehet a výrobky z dehtu	Asfaltové směsi neuvedené pod číslem 17 03 01	170302	886783	0%	1%
	Izolační materiály a stavební materiály s obsahem azbestu	Izolační materiály neuvedené pod čísly 17 06 01 a 17 06 03	170604	39967	0%	79%
Odpady ze zdravotní nebo veterinární péče a /nebo z výzkumu s nimi souvisejícího (s výjimkou kuchyňských odpadů a odpadů ze stravovacích zařízení, které bezprostředně nesouvisejí se zdravotní péčí)	Odpady z porodnické péče, z diagnostiky, z léčení nebo prevence nemocí lidí	Odpady, na jejichž sběr a odstraňování nejsou kladeny zvláštní požadavky s ohledem na prevenci infekce	180104	6649	10%	75%

Odpady ze zařízení na zpracování (využívání a odstraňování) odpadu, z čistíren odpadních vod pro čištění těchto vod mimo místo jejich vzniku a z výroby vody pro spotřebu lidí a vody pro průmyslové účely	Odpady z úpravy odpadů jinde neuvedené (např. třídění, drcení, lisování, peletizace)	Papír a lepenka	19120 1	218994	1%	0%
		Plasty a kaučuk	19120 4	110091	36%	4%
		Dřevo neuvedené pod číslem 19 12 06	19120 7	28099	0%	1%
		Textil	19120 8	2471	55%	32%
		Spalitelný odpad (palivo vyrobené z odpadu)	19121 0	160486	100%	0%
		Jiné odpady (včetně směsí materiálů) z mechanické úpravy odpadu neuvedené pod číslem 19 12 11	19121 2	384909	7%	24%
Komunální odpady (odpady z domácností a podobné živnostenské, průmyslové odpady a odpady z úřadů) včetně složek z odděleného sběru	Složky z odděleného sběru (kromě odpadů uvedených v podskupině 15 01)	Papír a lepenka	20010 1	264924	1%	0%
		Oděvy	20011 0	4779	2%	10%
		Textilní materiály	20011 1	9099	10%	14%
		Dřevo neuvedené pod číslem 20 01 37	20013 8	49074	1%	1%
		Plasty	20013 9	87586	3%	2%
	Ostatní komunální odpady	Směsný komunální odpad	20030 1	2810881	20%	74%
		Odpad z tržišť	20030 2	7787	8%	67%
		Uliční smetky	20030 3	102428	0%	28%
Objemný odpad		20030 7	442779	4%	81%	

PŘÍLOHA 2: SEZNAM SÍTÍ CZT NA ÚZEMÍ ČR S DODÁVKOU TEPLA NAD 100 TJ/ROK, DATA 2017

Lokalita	Palivo při výrobě tepelné energie [%]					Instalovaný tepelný výkon [MW]	médium	poptávka po teple [TJ/rok]
	Uhlí	Zemní plyn	Biomasa a jiné OZE	Topné oleje	Jiná paliva			
Beroun		100				54		120
Bohumín	92	6	2			34		158
Brno		77	2		21	1046		3700
Bruntál	79	21				49		145
Černožice nad Labem	100					34		227
Česká Lípa		100				79		257
České Budějovice	99	1				412		1612
Český Těšín		100				40		129
Cheb		99	1			78		135
Chropyně		100				11	TV	225
Děčín		89	11			89		259
Dvůr Králové nad Labem	94	6				67		163
Elektrárna Dětmárovice	100					2050	pára	581
Elektrárna Ledvice	92	8				789		1000
Elektrárna Prunéřov, Tušimice a Actherm	100					4220		1310
Elektrárna Tisová	100					781		654
Františkovy Lázně	100					20		135
Frýdek-Místek	60		40			161		625

Hodonín	20		80			275	pára	750
Jablonec nad Nisou		100				33		199
Jaroměř		100				14		115
Jihlava - blokové kotelny		88	12			49	TV	370
Jindřichův Hradec	0	5	94	1		79		231
Karviná a Havířov	98				2	493	HV	1870
Kladno	100					966		970
Klatovy	41	36		23		56	pára	172
Kolín	92	2			7	212	pára	869
Kopřivnice	65	10	25			194		330
Kralupy nad Vltavou		82		2	16	361		4580
Krnov	47		53			99		339
Kutná Hora			100			42		224
Liberec		39		1	60	181		1275
Litoměřice	100					42		258
Litvínov - Záluží	95	1			4	768		2629
Loučovice			100			40		485
Louny		100				30		112
Lovosice	97	3				253		1214
Mariánské Lázně		19	68	13		70	pára	259
Mělník	89	3			8	874	pára/HV	7406
Mladá Boleslav	71	8	21	1		414		1602
Most a Litvínov	100					1076	pára	1786
Náchod	72	28				108	pára	315
Nový Jičín		91	9			88		207
Nymburk	98	2				36		136
Olomouc	99			1		442	pára	1756
Opatovice nad Labem	100					1302	pára	4600
Opava	14	86				88	HV	123

Ostrava	77				23	1019	pára/HV	4640
Ostrov	79		21			93		228
Otrokovice	98	1			1	302	pára	1567
Pardubice - Semtín	89	11				275		182
Pelhřimov		3	95	2		50		107
Písek	97		2	1		81	pára	403
Planá nad Lužnicí a Sezimovo Ústí	99	1				96	pára/HV	499
Plzeň	65	1	21		13	900		3355
Přerov	99	1				350	pára	1880
Příbram	95	5				138	pára	472
Prostějov		100				74	TV	210
Rožnov pod Radhoštěm		100				87		200
Rychnov nad Kněžnou	89	11				21		109
Štětí	20	7	73			540		1088
Strakonice	99			1		206	pára	520
Šumperk		94	6			48		166
Tábor	98	2		1		209	pára	430
Třebíč		10	90			58	TV	135
Třinec	45	3			52	613		1670
Trmice	100					469	pára	2837
Trutnov	73		27			539	pára/HV	1335
Uherské Hradiště	97	3				46	pára	182
Ústí nad Labem - Střekov	100					248		800
Valašské Meziříčí		30			70	321	pára	194
Varnsdorf	83	17				64	pára	197
Vřesová	98				2	1669		1800
Vsetín		100				86	HV	349
Žatec	20		79	1		37		201

Žďár nad Sázavou	86	6	2		6	15	pára	237
Zlín	95	1	4			390	pára/HV	810