



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

# OPERAČNÍ VÝZKUM V ODPADOVÉM HOSPODÁŘSTVÍ: TECHNIKY REDUKCE ÚLOHY

OPERATIONAL RESEARCH IN WASTE MANAGEMENT: TASK REDUCTION TECHNIQUES

## DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. František Janošák

## ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Martin Pavlas, Ph.D.

BRNO 2022



## ABSTRAKT

Dizertační práce se zaměřuje na redukci výpočtové náročnosti vybraných úloh modelování v odpadovém hospodářství. Jsou zde představeny dva typy optimalizačních úloh. Nejdříve je pozornost směřována na úlohy dopravní. Současné výpočetní nástroje přistupují k dopravním úlohám pomocí značně zjednodušených modelů přepravních nákladů. V práci je představen přesnější model dopravních nákladů a je popsána jeho implementaci do dlouhodobě úspěšně využívaného unikátního výpočtového nástroje NERUDA. Vylepšený nástroj poskytuje přesnější výsledky, vyžaduje však více času na výpočet. V práci jsou popsány případy, kdy původní nástroj přináší výsledky srovnatelné s vylepšeným, a je navržena metodika, jak ještě před výpočtem zjistit, zda je nutné použití přesnějších modelů.

Práce pokračuje oblastí scénářových přístupů, které mají na výstupu výrazné množství výsledků dopravních úloh. Analýza výsledků a jejich zpracování je klíčové pro další využití v praxi. Aktuálně využívaný nástroj pracuje se scénáři budoucího vývoje, kde se pro každý scénář počítá jeden výsledek. Výsledky jsou v mnoha případech velmi podobné, ale jejich kvantita brání následné analýze. V práci je popsán přístup založený na shlukové analýze, která seskupuje výsledky do kategorií a výrazně tak napomáhá jejich zpracování a interpretaci.

Druhý typ úloh je reprezentován optimalizací koncepčního návrhu spolupráce zařízení na energetické využití odpadu a teplárny. Obecně se jedná o stochastickou úlohu celočíselného nelineárního programování. V práci je představen inovativní přístup, který na základě dekompozice úlohy a jejího paralelního řešení umožňuje dosahovat vyšší přesnosti, aniž by docházelo k výraznému prodloužení výpočtového času.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Odpadové hospodářství; energetické využití odpadu; svoz odpadu; redukční techniky; optimalizační nástroj NERUDA

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JANOŠŤÁK, František. Operační výzkum v odpadovém hospodářství: Techniky redukce úlohy. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137806>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Martin Pavlas.

## ABSTRACT

The dissertation thesis focuses on reducing the computational complexity of selected modeling tasks in waste management. Two types of optimization tasks are presented here. First, attention is focused on transport tasks. Current computational tools approach transport tasks with greatly simplified models of transportation costs. The thesis presents a more accurate model of transportation costs and describes its implementation into the long-term successfully used unique tool NERUDA. The improved tool provides more accurate results, however, requires more computational time. The work describes cases where the original tool provides results comparable to the improved one and suggests the methodology of how to identify, even before the calculation, whether the use of optimized models is necessary.

The work continues in the area of scenario approaches, which output a significant amount of transport task results. Analysis of the results and their processing is key for further use in practice. The currently used tool works with future development scenarios where one result is calculated for each scenario. In many cases, the results are very similar, but their quantity hinders the following analysis. The thesis describes an approach based on cluster analysis, which groups the results into categories and thereby significantly aids their processing and interpretation.

The second type of tasks is represented by the optimization of the conceptual design of a waste-to-energy plant and a heating plant cooperation. In general, this is a stochastic mixed integer non-linear programming problem. The work presents an innovative approach, which, based on the decomposition of the task and its parallel solution, allows working with higher accuracy without a significant increase in computing time.

## KEYWORDS

Waste management; waste-to-energy; waste collection; reduction techniques; NERUDA optimization tool

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem dizertační práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Martina Pavlase, Ph. D. 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 10.8. 2022

.....

Ing. František Janošťák

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto řediteli Ústavu procesního inženýrství prof. Ing. Petru Stehlíkovi, CSc., dr. h. c. za vytvoření podmínek pro doktorské studium, školiteli doc. Ing. Martinu Pavlasovi, Ph.D. za náměty i připomínky při zpracování této práce a v neposlední řadě školiteli-specialistovi Ing. Radovanu Šomplákovi, Ph.D., který mi byl velkou oporou a bez něhož by tato práce nikdy nemohla být dotažena do finální podoby.

## OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	7
1 ÚVOD .....	11
1.1 LEGISLATIVA .....	11
1.2 PRODUKCE, SLOŽENÍ A NAKLÁDÁNÍ S KO .....	15
2 REŠERŠE .....	21
2.1 DOPRAVNÍ ÚLOHY V OH .....	21
2.1.1 <i>Dosavadní výzkum na ÚPI v oblasti dopravních úloh</i> .....	23
2.2 ZPRACOVÁNÍ ODPADU .....	24
2.2.1 <i>Dosavadní výzkum na ÚPI v oblasti technickoekonomických modelů ZEVO</i> .....	26
3 CÍLE PRÁCE .....	28
4 REDUKČNÍ TECHNIKY VÝPOČTOVÝCH NÁSTROJŮ DOPRAVNÍCH ÚLOH .....	29
4.1 REDUKCE DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY .....	29
4.1.1 <i>Současný stav výpočtového nástroje NERUDA</i> .....	29
4.1.2 <i>Modelová dopravní úloha</i> .....	32
4.2 REDUKCE VÝPOČTOVÝCH SCÉNÁŘŮ .....	37
4.2.1 <i>Modelová úloha</i> .....	40
5 ZEVO INTEGROVANÉ V RÁMCI TEPLÁRENSKÉHO ZDROJE: OPTIMALIZACE KONCEPČNÍHO NÁVRHU .....	51
5.1 FINANČNÍ HODNOCENÍ PROJEKTU .....	51
5.2 HODNOCENÍ RIZIK POTENCIÁLNÍHO PROJEKTU .....	52
5.3 MODEL ZEVO .....	53
5.3.1 <i>Parní kotel</i> .....	54
5.3.2 <i>Turbíny</i> .....	55
5.3.3 <i>Poptávka po teple</i> .....	58
5.3.4 <i>Náklady, příjmy a investice</i> .....	60
5.4 VÝPOČET CENY TEPLA .....	63
5.5 TECHNICKO-EKONOMICKÝ MODEL KOOPERACE ZAŘÍZENÍ .....	65
5.5.1 <i>Matematický zápis modelu</i> .....	66
5.6 SCÉNÁŘE .....	69
6 ZÁVĚR .....	71
7 TVŮRČÍ AKTIVITY .....	73
8 PUBLIKAČNÍ ČINNOST .....	73
9 LITERATURA .....	75
PŘÍLOHA: NÁSTROJE ÚPI VYUŽÍVANÉ V DIZERTAČNÍ PRÁCI .....	81

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

### SEZNAM ZKRATEK

Zkratka	Význam
AD	Anderson-Darling
CAO	Cluster Analysis Onderlička
CF	Cash Flow
CZT	Systém centrálního zásobování teplem
ČSÚ	Český statistický úřad
FLP	Facility Location Problem
FPD	Fond pracovní doby
GAMS	Generalized Algebraic Modeling System
HN	Here-and-Now
IRR	Internal Rate of Return
JKN	Jednotkové konstantní náklady
JVN	Jednotkové variabilní náklady
KON	Model NERUDA s konstantními přepravními náklady
KOT	Kondenzační odběrová turbína
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
LHV	Lower Heating Value
MBÚ	Zařízení pro mechanicko-biologickou úpravu
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MINLP	Mixed Integer Non-linear Programming
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
NPV	Net Present Value
PCA	Principal Component Analysis
PP	Payback Period
PREKL	Překladiště
PS	Power Simplex
PT	Protitlaká turbína
SC	Supply Chain
SD	Shutdown
TG	Turbogenerátor
ÚPI	Ústav procesního inženýrství
VAR	Model NERUDA s variabilními přepravními náklady
VISOH	Veřejný informační systém odpadového hospodářství
WS	Wait-and-See
ZLF	Zařízení na zpracování lehké frakce



## SEZNAM SYMBOLŮ

Symbol	Jednotky	Význam
$A$	%	poměr produkce odpadu ku kapacitě zpracovatelských zařízení
$a_1, a_2$	-	regresní koeficienty modelu turbogenerátoru
$B$	%	hustota zpracovatelských zařízení v síti
$b$	-	počet zaměstnanců ZEVO
$C$	-	charakteristický poměr scénáře
$CF$	Kč/r	peněžní tok
$D, s(F)$	Kč/t	směrodatná odchylka korigované ceny na bráně
$d^D$	GJ/d	poptávka po teple na bázi denního průměru
$d^M$	GJ/d	poptávka po teple na bázi měsíčního průměru
$d_{fikt}$	MW <sub>t</sub>	zmařená pára ze ZEVO
$e^{TG}$	MW <sub>e</sub>	výkon turbogenerátorů
$e_{max}^{TG}$	MW <sub>e</sub>	maximální výkon turbogenerátoru
$e_{min}^{TG}$	MW <sub>e</sub>	minimální výkon turbogenerátoru
$E_f$	GJ/r	roční energetický vstup do systému paliv přispívající 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
$E_w$	GJ/r	roční množství energie obsažené ve zpracovávaných odpadech vypočítané za použití nižší čisté výhřevnosti odpadů
$F$	Kč/t	korigovaná cena na bráně
$FPD$	h/r	roční fond pracovní doby
$G$	t/r	kapacita zpracovatelského zařízení
$h_{max}^{TG}$	t/h, MW <sub>t</sub>	maximální hlnost turbín
$h_{min}^{TG}$	t/h, MW <sub>t</sub>	minimální hlnost turbín
$I$	Kč	Investice ZEVO
$I_B$	Kč	investice parního kotle ZEVO
$I_C$	Kč	další investice ZEVO
$I_S$	Kč	investice do bunkru pro skladování odpadu v ZEVO
$I_{TG}$	Kč	investice do turbogenerátorů ZEVO
$IRR$	%	vnitřní výnosové procento
$LHV$	GJ/t	výhřevnost odpadu
$m$	%	diskontní úroková míra
$N$	-	počet let životnosti projektu
$n$	Kč/r	roční náklady ZEVO
$n_{dif}$	Kč/r	rozdíl nákladů na provoz kotlů a příjmů za prodanou elektrickou energii
$n_{dif,fikt}$	Kč/r	variabilní náklady ZEVO při kooperaci s dalším tepelným zařízením
$n_{emp}$	Kč/r	náklady na zaměstnance ZEVO
$n_{gas}$	Kč/r	náklady na zemní plyn pro ZEVO
$n_{chem}$	Kč/r	roční náklady na chemikálie pro správnou funkci systému čištění spalin ZEVO
$n_{mai}$	Kč/r	náklady na údržbu ZEVO
$n_{rei}$	Kč/r	reinvestice v průběhu životnosti ZEVO

Symbol	Jednotky	Význam
$n_{rez}$	Kč/r	náklady spojené s nakládáním reziduí ze ZEVO
$n_{tep}$	Kč/r	náklady spojené s provozem kotlů
$n_{var}$	Kč/r	variabilní náklady spojené s výrobou tepla a elektřiny
$n_{var}^{TEP}$	Kč/r	$n_{var}$ tepelného zařízení bez ZEVO
$n_{var}^{ZEVO}$	Kč/r	$n_{var}$ tepelného zařízení a ZEVO
$n_{wat}$	Kč/r	náklady na vodu pro ZEVO
$NPV$	Kč	čistá současná hodnota
$o$	%	podíl vstupující páry do kondenzačního stupně a vystupující páry z prvního stupně KOT
$p$	Kč/r	roční příjmy ZEVO
$p_{el}$	Kč/r	příjmy za prodej el. Energie
$p_{fikt}$	Kč/r	fiktivní příjmy ZEVO
$p_{heat}$	Kč/r	příjmy za prodej tepla
$p_{scr}$	Kč/r	příjmy za prodej železného šrotu
$p_{was}$	Kč/r	příjmy za zpracování odpadu
$q$	MPa	tlak v odběrové síti (protitlak)
$q_v$	-	pokles výkonu TG závislý na protitlaku
$R, R^*$	-	koeficienty odlišnosti modelů KON a VAR
$R1$	-	energetická účinnost
$SD$	-	binární parametr definující odstávku ZEVO
$T^{KON}, T^{VAR}$	Kč	dopravní náklady, náklady za zpracování odpadu případně jejich součet při použití modelu KON, resp. VAR
$u$	MW <sub>t</sub>	zmařená pára za turbínou
$v^B$	GJ/h, MW <sub>t</sub>	tepelný výkon kotle
$v_{max}^B$	MW <sub>t</sub>	maximální výkon kotlů
$v_{min}^B$	MW <sub>t</sub>	minimální výkon kotlů
$v_{in}^{TG}$	MW <sub>t</sub>	tepelný výkon v podobě páry vstupující do turbíny
$v_{out}^{TG}$	MW <sub>t</sub>	tepelný výkon v podobě páry vystupující z turbín
$x$	t/h	množství odpadu dávkovaného na spalovací rošt (zpracovaný odpad)
$x_{max}$	t/h	maximální množství odpadu dávkovaného na spalovací rošt
$X^{KON}, X^{VAR}$	t	množství odpadu dovezené do zpracovatelského zařízení při použití modelu KON, resp. VAR
$y^B, y^{TG}$	MW <sub>t</sub>	tepelný tok páry z kotlů, turbín
$y^{HU}$	MW <sub>t</sub>	poptávka po teple
$y_{ZEVO}^{HU}$	MW <sub>t</sub>	poptávka po teple uspokojená ZEVO
$z$	%	procentuální zatížení turbogenerátoru
$z_{min}$	%	minimální procentuální zatížení turbogenerátoru
$Z$	Kč	$n_{dif}$ za celou životnost projektu ZEVO

Symbol	Jednotky	Význam
$\delta^{TG}, \delta^B$	-	parametry definující propojení toku páry mezi turbínami, kotli a CZT
$\mu^{TG}, \mu^B$	%	elektromechanická účinnost turbogenerátorů, účinnost kotlů
$\theta^B, \theta^{TG}$	-	binární proměnné definující odstávku/provoz kotlů, turbín
$\rho^{TG}$	-	parametr určující vícestupňové turbíny
$\tau^{TG}, \tau^B$	-	parametr definující možné odstavení turbín, kotlů
$\varphi$	Kč/t	cena na bráně zpracovatelského zařízení
$\varphi_{el}$	Kč/MWh <sub>e</sub>	cena elektrické energie
$\varphi_{fikt}$	Kč/MWh <sub>t</sub>	fiktivní cena tepla za zmařenou páru
$\varphi_{gas}$	Kč/m <sup>3</sup>	cena za jednotku zemního plynu
$\varphi_{heat}$	Kč/MWh <sub>t</sub>	výkupní cena tepla
$\varphi_{heat,ZEVO}$	Kč/MWh <sub>t</sub>	cena tepla na patě ZEVO
$\varphi_{chem}$	Kč/t odpadu	cena za chemikálie vztažená na množství odpadu
$\varphi_{rez}$	Kč/t	cena za nakládání s rezidui
$\varphi_{scr}$	Kč/t	výkupní cena železného šrotu
$\varphi_{tep}$	Kč/MWh <sub>t</sub>	náklady na provoz jednoho kotle
$\varphi_{tra}$	Kč/(t.km)	cena za dopravu
$\varphi_{was}$	Kč/t	cena na bráně ZEVO
$\varphi_{wat}$	Kč/m <sup>3</sup>	cena za jednotku vody
$\varphi_{zam}$	-	průměrná mzda zaměstnance ZEVO
$\omega$	%	porovnávací proměnná poptávek po teple

## 1 ÚVOD

V současné době se celý svět potýká s problematikou nakládání odpadu. Pozornost se zde soustředí především na jednu jeho složku, a to komunální odpad (KO), viz kap. 1.1. Dle (Hoornweg, 2012) v roce 2002 žilo ve městech přibližně 2,9 miliardy obyvatel, jejichž měrná produkce KO činila 233 kg odpadu na osobu ročně. Celkově se jednalo o 680 mil. tun za rok. Pro rok 2012 tato publikace odhadla nárůst obyvatel ve městech přibližně na 3 miliardy a produkci na 438 kg/osoba/r. Dle databáze statistického úřadu Evropské unie (Municipal waste statistics, 2021) vyprodukoval za rok 2020 průměrný obyvatel Evropy ročně 505 kg a obyvatel České republiky 507 kg KO. Do roku 2025 se předpokládá nárůst obyvatel měst na 4,3 miliardy a také produkce KO na 518 kg/os./r, což by znamenalo přibližně 2,2 bilionů tun KO za jeden rok. Takové množství je, při zachování současného nakládání s odpadem, dlouhodobě neudržitelné a je potřeba přijmout určitá opatření k řešení této situace, ať už z pohledu zátěže na životní prostředí, tak i potenciálu KO poskytovat zdroj jako druhotná surovina. Jedná se o závažnou problematiku, k jejímuž řešení nelze přistupovat pouze formou jednotlivců či zájmových skupin, ale je potřeba ji řešit komplexně, což vyžaduje její zahrnutí do legislativy jednotlivých členských uskupení.

### 1.1 Legislativa

Mnoho cílů, které jsou ukotveny v české legislativě, zabývající se odpadovým hospodářstvím (OH), vychází z několika evropských směrnic.

#### **1999/31/ES o skládkách odpadů**

Hlavním cílem této směrnice je stanovit „*pomocí přísných technických a provozních požadavků na odpady a skládky opatření, postupy a návody pro předcházení nebo maximální omezení negativních účinků skládkování odpadů na životní prostředí, a zejména znečištění povrchových vod, podzemních vod, půdy a ovzduší a také globální účinky včetně skleníkového efektu, jakož i veškerá z toho plynoucí rizika ohrožení lidského zdraví, a to v průběhu celého životního cyklu skládky.*“ (Směrnice EU 1999/31/ES)

V roce 2018 byla upravena dle (Směrnice EU 2018/850). Ta definuje takové změny, aby do roku 2030 bylo značně omezeno skládkování odpadu, který má potenciál k recyklaci či energetickému využití. Pokud už je nutné uložit odpad na skládku, směrnice dále stanovuje, aby došlo k maximální stabilizaci jeho organické složky a bylo tak minimalizováno riziko vlivu na životní prostředí či lidské zdraví. Taktéž přímo nařizuje hmotnostní hranici KO, která může být po daném roce uložena na skládku. Tato hranice je přímo implementována do české legislativy a je blíže definována níže v textu.

#### **2008/98/ES o odpadech**

Obecná směrnice o typech odpadu a možnostech, jak s nimi nakládat. Podobně jako předchozí směrnice má za cíl „*ochranu životního prostředí a lidského zdraví předcházením nepříznivým vlivům vzniku odpadů a nakládání s nimi nebo jejich omezováním a omezováním celkových dopadů využívání zdrojů a zlepšováním účinnosti tohoto využívání.*“ (Směrnice EU 2008/98/ES)

V roce 2018 byly definovány změny dle (Směrnice EU 2018/851). Nejdůležitější změnou je dodatek o zvyšování podílu recyklace a opětovného využití KO. Tato změna byla implementována do české legislativy. Konkrétně se o ní mluví v zákoně 541/2020 Sb. o odpadech. Velmi výraznou změnou je také samotná definice komunálního odpadu:

*„a) směsný odpad a tříděný odpad z domácností, zejména papír a lepenka, sklo, kovy, plasty, biologický odpad, dřevo, textil, obaly, odpadní elektrická a elektronická zařízení, odpadní baterie a akumulátory, a objemný odpad, zejména matrace a nábytek;*

b) směsný odpad a tříděný odpad z jiných zdrojů, pokud je co do povahy a složení podobný odpadu z domácností;

*Komunální odpad nezahrnuje odpad z výroby, zemědělství, lesnictví, rybolovu, septiků, kanalizační sítě a čistíren odpadních vod, včetně kalů, vozidla na konci životnosti ani stavební a demoliční odpad.*“ (Směrnice EU 2018/851)

### 94/62/ES o obalech a obalových odpadech

Zde je zmíněna problematika obalů, jelikož obaly tvoří nezanedbatelnou část KO. Mnoho z nich navíc končí v směsném komunálním odpadu (SKO), ať už kvůli nedokonalé separaci či špatně zvolených materiálech, které je vylučují z tříděných složek.

Jedním z účelů směrnice je stanovit „opatření, jejichž první prioritou je prevence vzniku obalových odpadů a dalšími doplňujícími hlavními zásadami je opakované používání obalů, recyklace a další formy využití obalových odpadů, jimiž se omezí množství těchto odpadů určených ke konečnému odstranění.“ (Směrnice EU 94/62/ES)

I tento dokument byl v roce 2018 mírně pozměněn dle (Směrnice EU 2018/852). Změna se týká minimálního množství obalového odpadu, které musí být od daného roku recyklováno. Hodnoty jsou navíc specifikovány pro každý materiál (plast, dřevo, papír atd.) zvlášť.

### Hierarchie nakládání s odpadem

Na rozdíl od definice KO, zůstala hierarchie nakládání s odpadem neměnná, viz obr. 1. Už z definice této hierarchie je vidět snaha evropské komise docílit minimalizace vzniku nového odpadu.



**Obr. 1 Hierarchie nakládání s odpadem (Janošák, 2014)**

Bohužel vzniku odpadu nelze předcházet absolutně, opětovné využití má také pouze omezené pole působnosti a recyklace je v současné době vhodná jen pro některé materiály, ať už z důvodu nevhodné technologie nebo finanční náročnosti (Bohm, 2010). Pro značnou část odpadu je proto recyklace či opětovné využití v současné době neuskutečnitelné. Zbývá tedy energetické využití a skládování. Pro dodržování této hierarchie slouží tzv. cíle OH, které jsou ukotveny v české legislativě.

### Cíle OH

Jednotlivé cíle OH stanovuje v České republice (ČR) zákon 541/2020 Sb. o odpadech. Tento zákon v mnoha věcech vychází ze zmiňované směrnice 2008/98/ES. Především je to vidět na příloze č. 1 tohoto zákona, kde je stanoveno pět konkrétních cílů. První tři body jsou téměř přímým přepisem z evropských směrnic, pouze doplněné o území ČR, na kterém se KO vyprodukuje. Poslední dva již evropská legislativa nespécifikuje a jde pouze o cíle stanovené ČR.

*„1. Zvýšit do roku 2025 úroveň přípravy k opětovnému použití a úroveň recyklace komunálních odpadů nejméně na 55 % celkové hmotnosti komunálních odpadů vyprodukovaných na území České republiky.*

*2. Zvýšit do roku 2030 úroveň přípravy k opětovnému použití a úroveň recyklace komunálních odpadů nejméně na 60 % celkové hmotnosti komunálních odpadů vyprodukovaných na území České republiky.*

**3.** Zvýšit do roku 2035 úroveň přípravy k opětovnému použití a úroveň recyklace komunálních odpadů nejméně na 65 % celkové hmotnosti komunálních odpadů vyprodukovaných na území České republiky.

**4.** Odstraňovat uložením na skládku v roce 2035 a v letech následujících nejvýše 10 % z celkové hmotnosti komunálních odpadů vyprodukovaných na území České republiky.

**5.** Energeticky využívat v roce 2035 a v letech následujících nejvýše 25 % z celkové hmotnosti komunálních odpadů vyprodukovaných na území České republiky; toto množství může být navýšeno o rozdíl mezi množstvím komunálních odpadů, které mohly být uloženy na skládku podle bodu 4, a skutečným množstvím komunálních odpadů uložených na skládku.“ (zákon 541/2020 Sb.)

Pro účely této práce jsou důležité právě poslední dva body. Bod 4 totiž popisuje výrazné omezení skládkování a bod 5 povoluje energetické využívání KO až do 25 % hmotnosti. Jak bylo zmíněno výše, tak potenciál k energetickému využití má SKO, jež zastává přibližně 50 % z KO, viz kap. 1.2. I kdyby se do budoucna podařilo zvýšit úroveň separace natolik, že se v SKO eliminuje výskyt separovaných složek (papír, plast, sklo, kov, bioodpad, elektro), tak se vzhledem k analýze odpadu (viz obr. 6) bude SKO pohybovat kolem právě zmíněných 25 % z KO, resp. 35 % pokud se započítá i 10 % pro skládkování. Do budoucna by měl být kladen důraz na zpracování SKO energeticky v tzv. zařízení na energetické využití odpadu (ZEVO).

### Spalovna vs. ZEVO

Aby se jednalo opravdu o ZEVO, nikoliv o pouhé zařízení pro termické odstranění odpadu, musí spalování odpadu splňovat tři základní podmínky.

1. Musí dosahovat vysoké energetické účinnosti, kde výpočet je stanoven ve vzorci (1). Minimální hranice, která je nutná pro uznání spalování jako energetické využití, je stanovena na hodnotu 0,6 pro zařízení provozovaná před datem 1.1.2009, resp. 0,65 pro zařízení, která získala oprávnění k provozu až od roku 2009.

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

- „ $E_p$  se rozumí roční množství vyrobené energie ve formě tepla nebo 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 výhřevnosti 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.“ (zákon 540/2020 Sb.)
2. Po zapálení nepotřebuje ke spalování dodávat další podpůrné palivo.
  3. Ke spalování nesmí být předávány odděleně separované složky KO, které jsou vhodné k recyklaci či opětovnému využití.

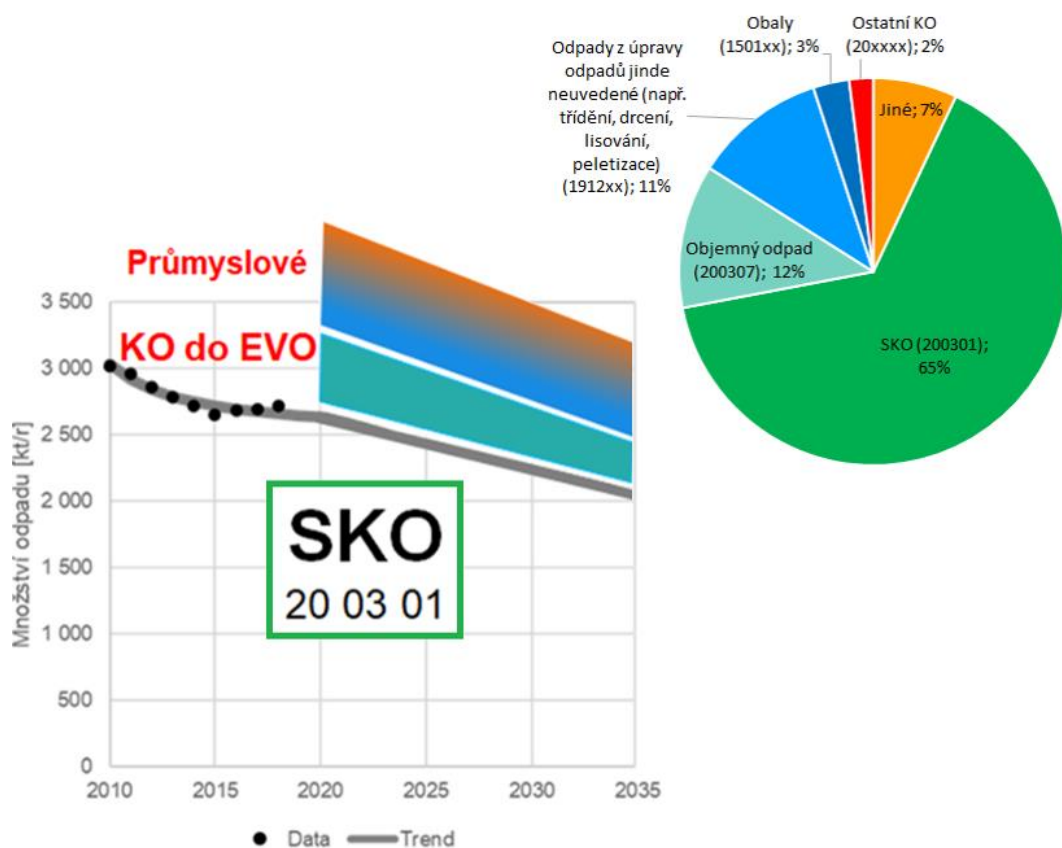
### ZEVO na území ČR

Na území ČR se v současnosti nachází čtyři zařízení, které spalují KO a splňují podmínky pro ZEVO. Nejstarší z nich byla postavena v Brně už v roce 1905 a nyní dokáže zpracovat až 248 kt odpadu ročně (tzv. kapacita zařízení). Další zařízení vzniklo v Praze v roce 1997, které po rekonstrukci, která byla dokončena na přelomu loňského a letošního roku navýšila kapacitu na celých 330 kt/r. Jedná se

o maximální dovolenou hodnotu dle současného povolení (tzv. provozní kapacita). Technická kapacita zařízení je však 394 kt/r. V roce 2019 byla podána EIA (Environmental Impact Assessment), která požaduje sjednocení provozní a technické kapacity (Sjednocení technické a roční kapacity ZEVO Malešice, 2019), k čemuž Ministerstvo životního prostředí (MŽP) podalo souhlasné stanovisko. Předpokládaný přechod ke kapacitě 394 kt/r je plánován na rok 2023. Od roku 1999 je v provozu zařízení v Liberci s kapacitou 96 kt/r. Nejnovější zařízení se nachází na okraji Plzně, které bylo vybudováno v roce 2016. Jeho současná kapacita činí 95 kt/r.

Celkově má tedy ČR k dispozici zpracovatelskou kapacitu 833 kt/r. Z obr. 5 lze vyčíst, že produkce KO se pohybuje pod hranicí 6 000 kt ročně. To znamená, že pokud se hodnota příliš nezmění, tak bude možnost energeticky využívat necelých 1 500 kt/r (aktuální produkce SKO se pohybuje kolem 2 500 kt). Navíc kapacita ZEVO není určena pouze pro zpracování KO, ale také některých průmyslových odpadů.

Už dle starších odhadů (Šomplák, 2015) kapacita českých ZEVO nebude ani zdaleka stačit na pokrytí produkce spalitelných odpadů, která by mohla být energeticky využita. To potvrzuje i aktuální prognóza provedená na Ústavu procesního inženýrství (ÚPI), která odhaduje aktuální celkový potenciál hmotnostního toku pro ZEVO na 3 500 až 4 000 kt/r, viz obr. 2 (vlevo). Zároveň zachycuje i predikci tohoto toku do budoucna. Oproti tomu koláčový graf na obr. 2 (vpravo) zobrazuje podíl jednotlivých typů odpadu, které se na hmotnostním toku podílejí.

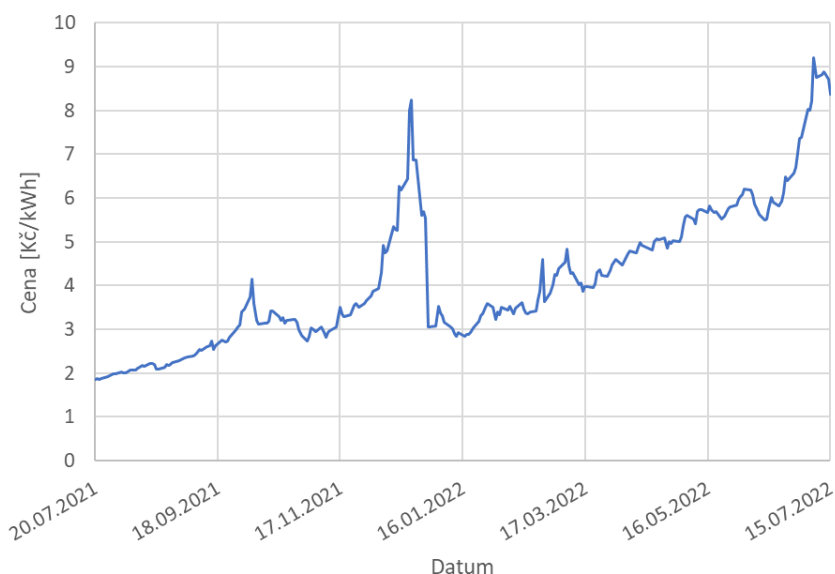


**Obr. 2** Produkce (vlevo) a složení (vpravo) spalitelných materiálů nevyužitých odpadů

Z pohledu nutnosti zpracování odpadu významně nahrává aktuální i budoucí situace výstavbě nových ZEVO, ale stále se tyto projekty potýkají se spoustou komplikací. Není to jen částečně odmítavý postoj veřejnosti, ale samozřejmě je to i otázka ekonomické stability, kterou si takový projekt musí zajistit.

Nynější světové dění (pandemie COVID-19, válka na Ukrajině) značně přispívá k nejistotám, jak v politických rozhodnutích, tak hlavně v cenách surovin i energií. Na obr. 3 je znázorněn vývoj cen

elektřiny na burze v posledním roce. Je vidět, že cena vzrostla až čtyřnásobně. U zemního plynu byl nárůst na necelý dvojnásobek. Obě tyto komodity ovlivňují i cena tepla. Jak následně ukazuje obr. 34, tak příjmy ZEVO z prodeje tepla a elektřiny mohou činit kolem 30 % z celkových výnosů. Pokud se ceny udrží na současných hladinách, případe ještě porostou, bude to pro ekonomiku ZEVO výrazné plus.



**Obr. 3 Vývoj cen energií na burze (Energie - vývoj cen energií na komoditních trzích, 2022)**

Výhodnější podmínky z hlediska ekonomiky ZEVO by také mohla přinést změna poplatku za uložení využitelného odpadu (kam spadá i KO) na skládku. Od roku 2009 byl poplatek stanoven zákonem č. 106/2005 Sb. na hodnotu 500 Kč/t odpadu a až s příchodem zmíněného zákona č. 541/2020 Sb. došlo k jeho navýšení. V roce 2021 už stoupla hodnota na 800 Kč/t a do roku 2029 by se měla vyšplhat na 1850 Kč/t, což by mohlo výrazně pomoci ZEVO s potlačením konkurence skládek.

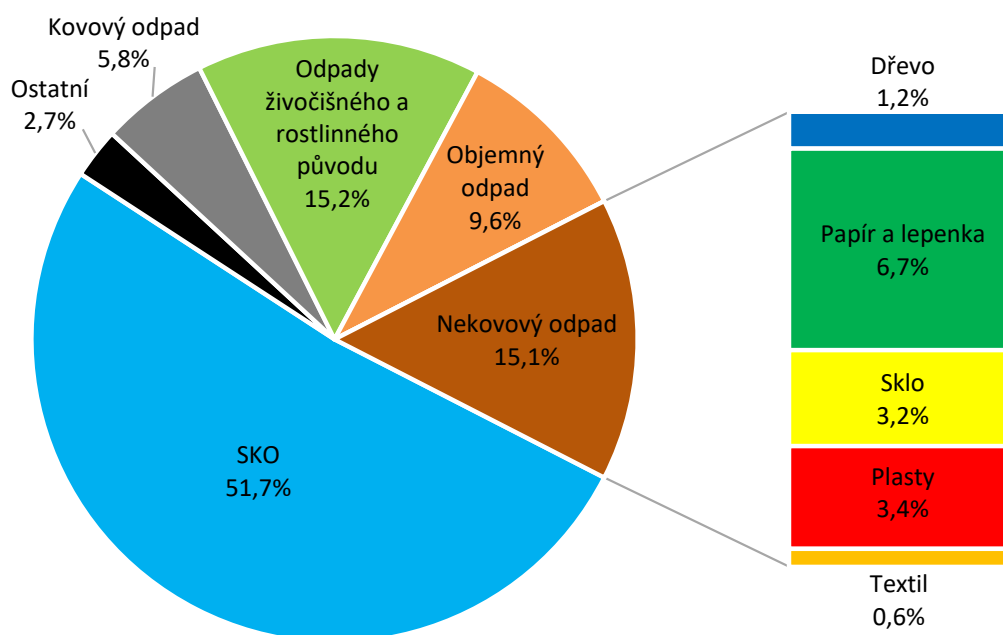
## 1.2 Produkce, složení a nakládání s KO

Jak vyplývá z definice KO zmíněného v kapitole 1.1, skládá se KO z několika složek. Poměr jejich zastoupení je proměnlivý a závisí na analyzovaném období a území. Konkrétní množství jednotlivých složek KO v ČR v roce 2020 shrnuje tab. 1. Grafické znázornění zastoupení těchto složek ukazuje koláčový graf (obr. 4). Pod zkratkou SKO je zde myšlen směsný komunální odpad, což je zbytková složka KO, která zůstává po vyseparování jednotlivých tříděných složek, které byly vyjmenovány v samotné definici KO, viz kap. 1.1.

**Tab. 1 Množství jednotlivých složek KO v ČR za rok 2020 (Produkce, využití a odstranění odpadů za období 2020, 2021)**

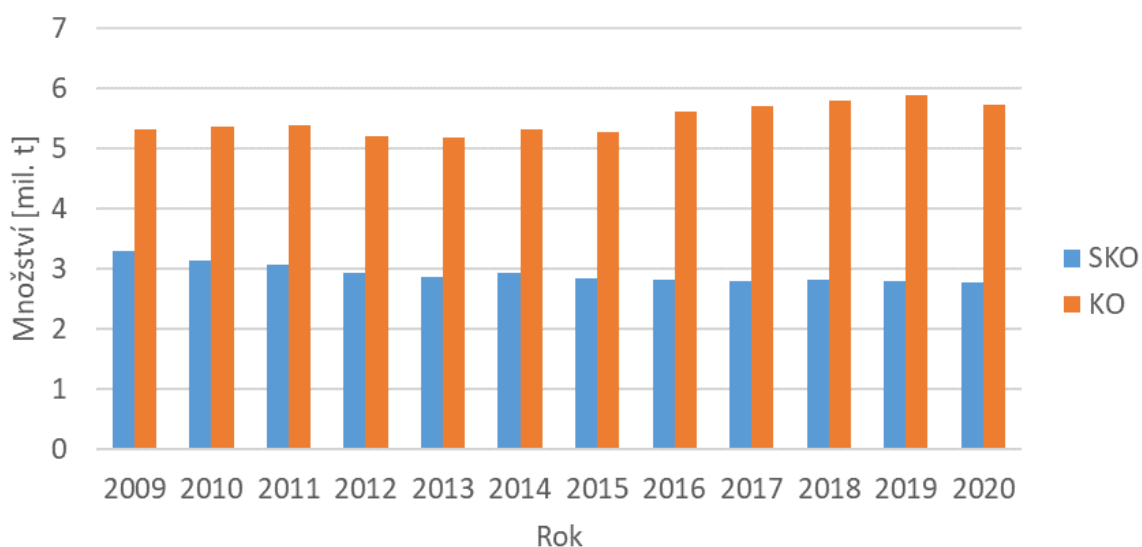
Typ odpadu	Množství [t]
SKO	2 798 839
Kovový odpad	145 294
Odpady živočišného a rostlinného původu	312 563
Dřevo	822 928
Papír a lepenka	522 534
Sklo	66 023
Plasty	361 836
Textil	171 961
Jiný	184 447
<b>Celkem KO</b>	<b>5 418 773</b>





**Obr. 4** Procentuální složení KO v ČR 2020 (Produkce, využití a odstranění odpadů za období 2020, 2021)

Po vyseparování složek z KO vhodných k opětovné využití, recyklaci či kompostování zůstává velká část označována jako SKO, viz obr. 4. Vývoj produkce KO a SKO od roku 2009 popisuje obr. 5.



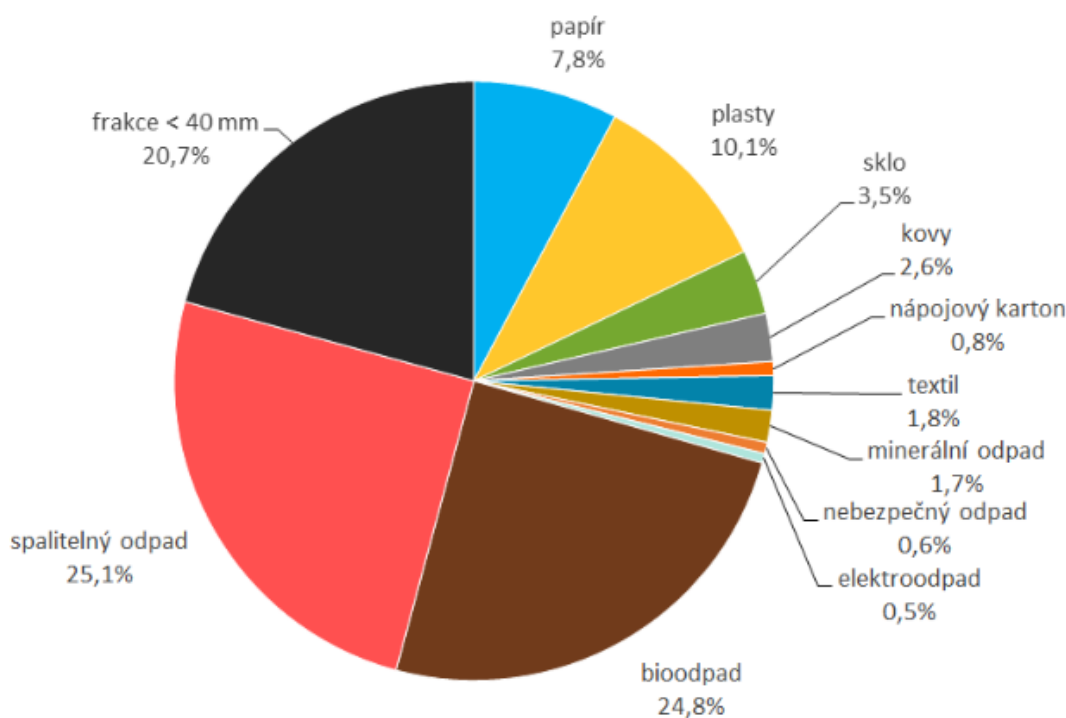
**Obr. 5** Vývoj produkce odpadu v ČR<sup>1</sup>

Zde je potřeba upozornit, že data využitá ke konstrukci obr. 4 pochází ze statistického úřadu ČR (ČSÚ), zatímco graf na obr. 5 byl vytvořen na základě dat z veřejného informačního systému odpadového hospodářství (VISOH). Databáze VISOH totiž neposkytuje data v potřebné míře detailu, proto bylo v obr. 4 a tab. 1 využito databáze ČSÚ. V aktuální situaci si tyto databáze zcela neodpovídají, ale postupně dochází k jejich sjednocení. I přes mírné rozdíly v datech je však zřetelně vidět, že SKO tvoří

<sup>1</sup> Zdrojem dat je databáze VISOH, která je dostupná z: <https://isoh.mzp.cz/visoh>.

nezanedbatelnou, relativně stabilní složku KO. Mírně sestupnou tendenci v podílu SKO ku KO registrují oba zdroje dat, což může být způsobeno například zvýšenou mírou separace, jelikož SKO, i přes snahu vládních i nevládních organizací, obsahuje některé využitelné složky, které by se daly vytřídit. Otázka zaměřená na jejich množství je však obtížná. SKO se oproti KO sváží jako jeden odpad, tedy všechny složky jsou smíseny do jednoho celku. Pro získání složení je pak nutné tento celek roztrždit a oddělit od sebe jednotlivé frakce. Vzhledem k promísení jednotlivých frakcí převážně s biologicky rozložitelným odpadem je tato práce obtížná a dosavadní rozborů neměly jednotně stanovený postup, jak je provádět. Až teprve v roce 2021 byla ÚPI vytvořena certifikovaná metodika (Veverka, 2021), která je schválena ministerstvem životního prostředí a měla by zajistit porovnatelné výsledky.

Do této doby byly rozborů dělané dle metodiky, kterou si stanovila každá firma separátně. Pokud byla daná metodika dodržována pro vícero rozborů, pak i tato data přináší hodnotnou informaci. Pro ilustraci je na obr. 6 zobrazen odhad složení SKO dle firmy EKO-KOM a.s.

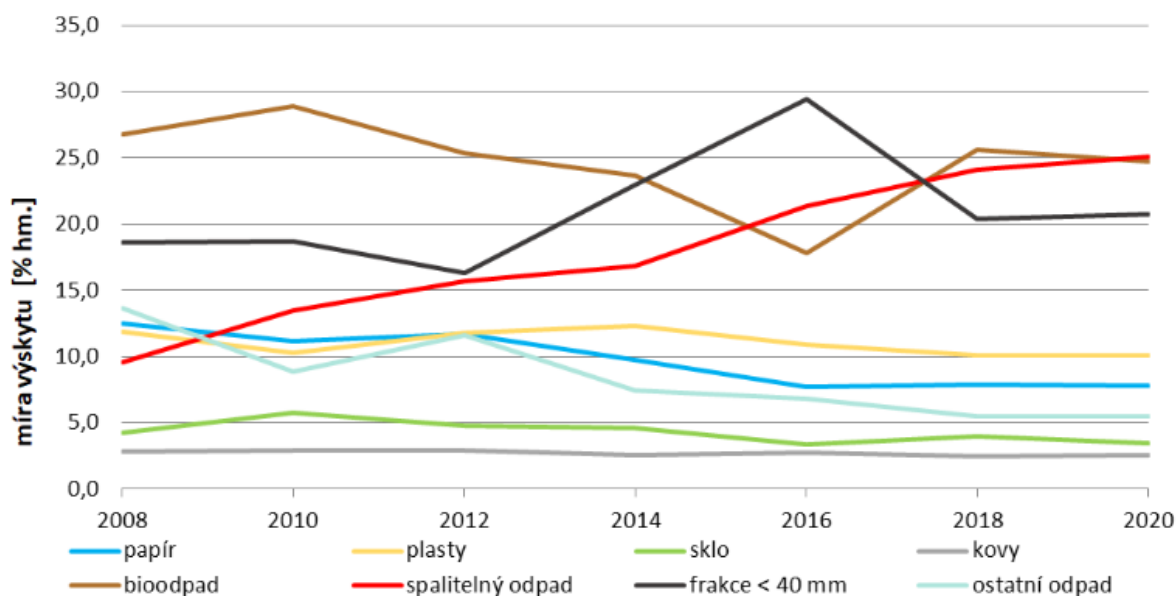


**Obr. 6** Skladba SKO z obcí ČR 2020 [% hm.] (Rozborů skladby směsného komunálního odpadu z obcí v roce 2020, 2021)

Dle jejich metodiky je spalitelný odpad definován jako frakce, která po vytřizení všech ostatních složek nepropadne sítím s oky 40x40 mm. Jedná se především o hygienické potřeby, útržky textilu apod. Jak ukazuje další graf (obr. 7), tak dle jejich měření se složení SKO za posledních 12 let výrazně neměnilo. Navíc je vidět patrný nárůst spalitelných odpadů, což přímo vyzývá k tomu, že SKO jako takové je vhodné v energetickém využití odpadu. Teprve v případě, že energetické zpracování není možné, např. z důvodu nedostatku kapacit, by se mělo přistupovat ke skládkování.

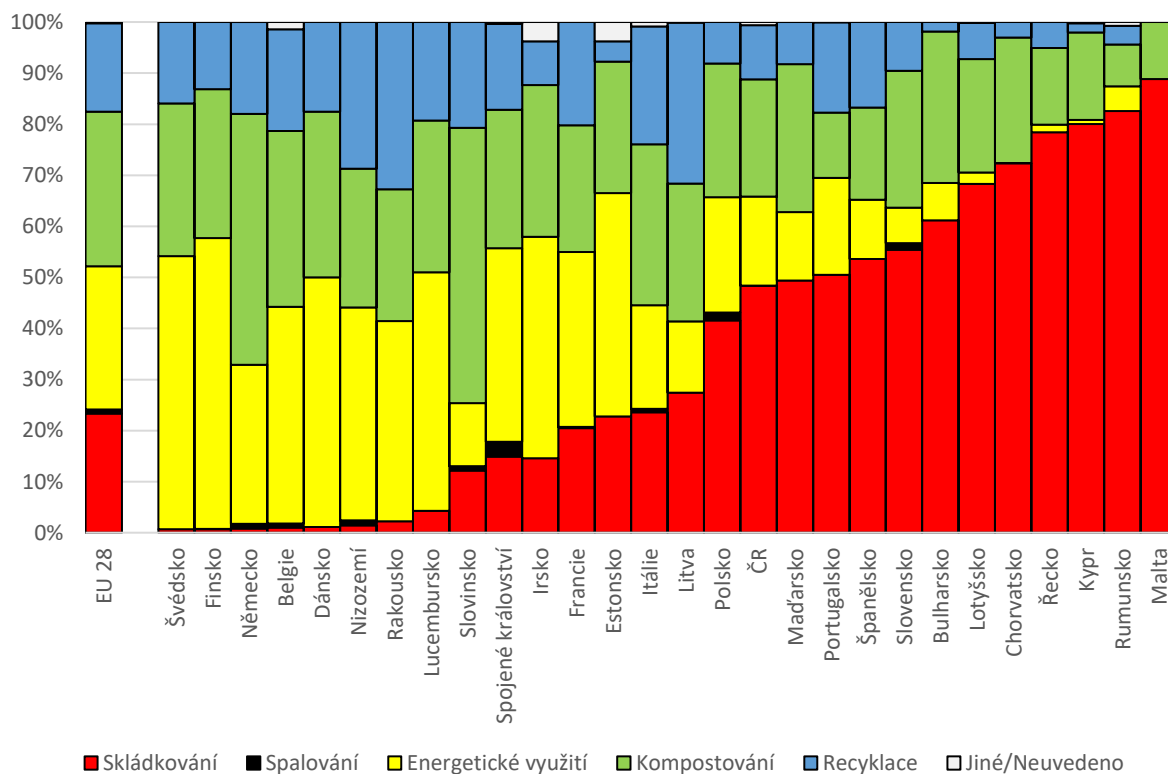
Snahou je se skládkování vyhnout úplně, proto se do budoucna jeví výstavba nových ZEVO jako vhodná alternativa. V některých zemích je zákaz skládkování podpořen i legislativně. Typickým příkladem je ČR, na kterou je tato práce zaměřena. Hlavním důvodem použití dat z ČR pro výzkumné záměry je dostupná datová základna. Vytvořené přístupy a doporučení jsou však obecné povahy a je možné je aplikovat i na ostatní státy.

## Operační výzkum v odpadovém hospodářství: techniky redukce úlohy



**Obr. 7 Skladba SKO: míra výskytu jednotlivých látkových skupin (Rozbor skladby smíšeného komunálního odpadu z obcí v roce 2020, 2021)**

Velice častým argumentem, který se staví proti energetickému využití, je obava o snížení potenciálu recyklace. Poměr recyklace vůči ostatním typům zpracování současného stavu zemí Evropské unie (EU) je zobrazen na obr. 8. Pod pojmem „Jiné/Neuvedeno“ se převážně skrývá rozdíl v hmotnosti mezi celkovou hodnotou zpracovaného odpadu a sumou hmotností odpadu dle zpracování. Při pohledu na tento graf je vidět, že se zvyšující mírou energetického využití ruku v ruce klesá spíše míra skládkování než recyklace.



**Obr. 8 Zpracování odpadu v EU v roce 2018 (Municipal waste by waste management operations, 2021)**

Země s pokročilejším OH upouštění od skládkování odpadu, jelikož jsou si dobře vědomy, že jeho potenciál, jak energetický, tak materiální, je velký a skládkováním by se připravily o cennou surovinu. Místo toho se uchylují k energetickému využití, jelikož materiální využití u veškerých odpadů není možné. Potvrzují to nejen data z obr. 8, ale i narůstající recyklace a počet ZEVO v EU. Zatímco v roce 2010 bylo v EU pouze 452 ZEVO v provozu, které zpracovaly 73,35 mil. tun odpadu. V roce 2017 už bylo v provozu 492 ZEVO, která zpracovala 96 mil. Tun odpadu. Počet provozovaných ZEVO pro jednotlivé státy v roce 2017 je na obr. 9.



**Obr. 9 Počet ZEVO v EU v roce 2017 (Waste-to-Energy Plants in Europe in 2017, 2019)**

Z dosavadních dat je zřejmé, že výstavba nových ZEVO je vhodným krokem kupředu, která zároveň pomůže naplnit evropské legislativní normy OH. Projekty nových ZEVO jsou velmi složité a pro jejich uskutečnění je potřeba velká datová základna, která prokáže, zda vybrané místo výstavby je vhodné, ať už z hlediska odbytu vyrobené energie, tak množství odpadu v jejím okolí. Nástroje, které potřebná data přinesou, jsou dlouhodobě vyvíjeny na ÚPI. Tato práce je využívá, modifikuje a přináší nové aktualizace tak, aby byly co nejlépe použitelné na popsanou problematiku a přinesly přínos nejen pro potenciálního investora výstavby ZEVO, ale i producenty, současné provozovatele již postavených ZEVO apod.

Cílem dizertační práce je rozšíření existujících výpočtových nástrojů založených na pokročilých matematických metodách, které by představovaly podpůrný nástroj pro řešení komplexních úloh v OH. Konkrétně se jedná o srovnávací úlohy, strategické rozhodování při výstavbě nových ZEVO, případně řízení provozu existujících teplárenských zařízení v kombinaci se ZEVO, kde je potřeba zohlednit

ekonomická i technologická hlediska a počítat s rizikovými situacemi spojenými s vývojem neurčitých parametrů.

Výzkumné práce byly motivovány řešenými projekty na ÚPI.

- 01.01.2014 - 31.12.2018: "Waste-to-Energy (WTE) Competence Centre" č. TE02000236.
- 01.07.2018 - 30.6.2022: "Strategické partnerství pro environmentální technologie a produkci energie" reg. č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_026/0008413.

Práce je koncipována do 6 kapitol. v úvodní kapitole byla nastíněna aktuální situace OH se zaměřením na KO. Popsaná problematika v kapitole 0 poukazuje na fakt, že situací v OH je potřeba se zabývat. Zahrnuje to nejen optimalizaci současného stavu (svoz, zpracování v existujících zařízeních), ale je potřeba uvažovat do budoucna, kdy budou potřeba další zařízení na zpracování odpadu, jakým je například ZEVO.

Kapitola 2 už se zaměřuje na možnosti, jak tuto problematiku uchopit. Definuje dva základní úkoly, kterými se tato práce zabývá. Jedná se o dopravní úlohy (kapitola 2.1), kde se řeší především svoz KO a jeho zpracování. Kapitola 2.2 řeší spíše úlohy zabývající se ekonomikou zařízení na zpracování odpadu. Je zde poukázáno jednak na přístupy ostatních zahraničních autorů, ale jsou zde zmíněny i úspěchy na ÚPI. Mezi úspěchy se řadí několik softwarových nástrojů, které problematiku už nějakým způsobem řeší. Především je zde kladen důraz na možnosti jejich dalšího vývoje.

Navazující kapitola 3 shrnuje tyto možnosti a vyvozuje z nich konkrétní cíle dizertační práce.

Kapitola 4 se věnuje dopravním úlohám. Řešené dopravní úlohy na ÚPI jsou velmi rozsáhlé, a tedy i jejich výpočet je časově náročný. V některých případech dochází k jejich zjednodušení, což může vést k nepřesným výpočtům. Kapitola 4.1 se zabývá přesností zjednodušeného modelu. Konkrétně analyzuje situace, kdy je možný zjednodušený model využít bez velkého vlivu na výsledky. Kapitola 4.2 poukazuje na časovou náročnost výpočtů a navrhuje možnosti redukce úlohy pomocí shlukové analýzy.

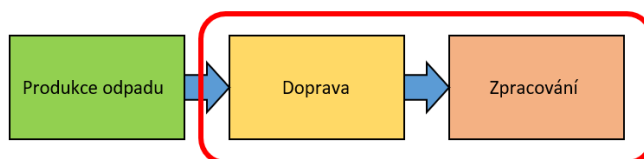
Kapitola 5 se zabývá koncepčním návrhem ZEVO a jeho integrací do existujícího systému jiného tepelného zařízení. Představený výzkum vychází z předchozích akademických prací autora. Jedná se o problematiku koexistence několika tepelných zařízení (teplárna, ZEVO), z nichž jedno je ZEVO. Model využívá výsledků z nástrojů pro dopravní úlohy a na jejich základě pak specifikuje optimální provoz zmíněných tepelných zařízení. Primárně se model zaměřuje na výstavbu nových ZEVO v lokalitě s teplárnou a ověřuje ekonomickou stránku projektu. Vývoj provedený v této práci je zaměřen na výpočetní krok (den, měsíc, rok), který výrazně ovlivňuje přesnost a výpočetní náročnost. Představený přístup definuje kompromis mezi těmito parametry a zároveň je dostatečně názorný z pohledu výsledků.

Závěrečná kapitola 6 poskytuje souhrnný náhled na popsanou problematiku, shrnuje dosažený vývoj a zároveň definuje i další možné inovace, které už však přesahují rámec této práce.

## 2 REŠERŠE

Stále více se mluví o udržitelnosti OH s ohledem na ekonomiku a dopady na životní prostředí. Na to reagují i vědecké práce, které se uchylují k myšlence tzv. cirkulární ekonomiky. Co přesně už se dá považovat za cirkulární ekonomiku, definuje (García-Barragán, 2019). Hlavní myšlenka je zřejmá, udržet primární surovinu v oběhu co nejdéle, než se z ní stane odpad. Přínos cirkulární ekonomiky oproti lineárnímu konceptu je popsán například v (Genovese, 2017), kde se autoři zabývají potravinářským a chemickým průmyslem.

Pro dosažení cirkulární ekonomiky je dobře nastavené OH nesmírně důležitou podmínkou. Upozorňuje na to (Malinauskaite, 2017), který porovnává kvalitu OH v několika evropských zemích. Ač poukazuje na fakt, že správnou cestou cirkulární ekonomiky je horní část hierarchie nakládání s odpadem (obr. 1), dodává, že ZEVO je také jeho nedílnou součástí. Samotné nakládání s odpadem je ovlivněno mnoha faktory. Nejedná se pouze o dostupné technologické postupy, ale výraznou měrou zde zasahují i politická rozhodnutí. (Malinauskaite, 2017) dává jako příklad Estonsko, kde pomocí legislativního zvýšení daní za ukládání odpadu na skládku došlo k výraznému posunu a rozvoji technologií na využití odpadu jako energie. K výraznému posunu z hlediska OH pomáhají samozřejmě technickoekonomické modely, na jejichž základě se dá mnohem lépe rozhodovat, zda si je zařízení (recyklační závod, třídící linka, ZEVO) schopno v dané lokalitě zajistit životaschopný provoz. Většinou se jedná o rozsáhlé úlohy, které zároveň vyžadují vysokou úroveň detailu. Jedná se o velmi složitou problematiku, která vyžaduje k řešení sofistikované výpočtové nástroje založené na pokročilých matematických metodách. Na obr. 10 je znázorněno základní dělení těchto metod v závislosti na tom, kterou částí OH se zabývají.



**Obr. 10 Zjednodušené schéma úloh OH**

Z hlediska informací o odpadu se například jedná o odhad jeho produkce, případně jeho vlastností. Jednou ze studií zabývajících se touto problematikou je (Pavlas, 2017), která se specializuje na nebezpečný odpad. Popisuje nástroj Justine, který na základě regresních modelů, heuristických a optimalizačních přístupů pro úlohy vyrovnání dat předpovídá charakter a množství odpadu na úrovni různých územních celků. Obdobná problematika je řešena i v (Smejkalová, 2022), kde je představen inovativní přístup prognózy na základě modelování trendů v historických datech.

Důležitou charakteristikou odpadu je jeho výhřevnost<sup>2</sup> (LHV – lower heating value). V závislosti na analýze složení odpadu existuje mnoho metod, jak ji spočítat. Jejich porovnání je uvedeno v (Lin, 2015). Samotná část označená jako produkce odpadu však není cílem tohoto výzkumu, je zde uvedena pouze pro dokreslení složitosti celého výpočtu. Výraznější pozornost je směřována až na dopravu a samotné zpracování odpadu.

### 2.1 Dopravní úlohy v OH

Pod problematiku dopravy odpadu lze zahrnout mnoho úloh z OH. Podle jejich charakteru se dá rozlišovat například mezi

- Supply chain (SC) – přesun produktu od producenta až ke konečnému spotřebiteli,
- Facility Location problem (FLP) – řešení vhodné lokality pro výstavbu zařízení.

<sup>2</sup> Energie, která se uvolní při spálení jednotkové hmotnosti paliva, v tomto případě odpadu.

V rámci OH problematika SC zahrnuje tok odpadu od producentů a jeho dopravu do zpracovatelského zařízení. Typický tok odpadu začíná u producenta a končí v některém zpracovatelském zařízení. Mezizastávkou mohou být překladiště (PREKL), kde je odpad přeložen, případně slisován a připraven na další přepravu. Následně může skončit na skládce odpadu, být energeticky využit v ZEVO nebo zpracován v zařízení pro mechanicko-biologickou úpravu (MBÚ). Základní princip MBÚ spočívá ve snížení hmotnosti odpadu biologickou úpravou (sušením). Následuje mechanická úprava, při níž dojde k dodatečnému vyseparování využitelných složek (kovy, plasty atd.). Mechanická úprava je u většiny zařízení dost podobná (magnetické separátory, drtiče, síta atd.), ale z pohledu biologické úpravy už se dělí na několik typů, viz (Bačík, 2005). Významným produktem MBÚ je tzv. lehká frakce, což je zbytková složka odpadu s vysokou LHV, která se využívá k výrobě energie v zařízení na zpracování lehké frakce (ZLF).

Dosavadní úlohy v této oblasti si nevystačí pouze s modelováním toku odpadu, ale jsou obohaceny o neznámé v podobě potencionálních zařízení, která ještě nejsou postavena. Zde už se přechází do problematiky FLP, která je podrobněji popsána v (Azarmand, 2009), (Daneshzand, 2009) nebo (Moradi, 2009). V důsledku toho se dimenzování systému nakládání s odpadem stává komplikovanou úlohou, která musí brát v úvahu časové rozložení, dopravní strukturu, typy odpadu, kapacitu a ekonomiku zpracovatelského řetězce. Při dlouhodobém plánování je tedy třeba pečlivě zvážit polohu zařízení. Je velmi pravděpodobné, že po jisté době se optimální lokalita zařízení z hlediska výpočtu bude měnit. Tímto přístupem se zabývá (Zanjirani Farahani, 2017), který ve své práci rozebírá možnosti přesunu zařízení. V účelové funkci potom zohledňuje nejen náklady spojené s výstavbou, ale také náklady na přesun zařízení. Rozsáhlou rešeršní prací, která se problematikou FLP zabývá je také (Barbosa-Póvoa, 2018). Porovnává přístupy udržitelnosti projektu, které se dají definovat pomocí několika aspektů. Nejčastější aspekt, který se používá, je samozřejmě ekonomický, kde se běžně lze setkat s minimalizací celkových nákladů (Tong, 2014). V dnešní době se mnoho prací soustředí i na environmentální dopady. Používaným měřítkem vlivu na životní prostředí jsou faktory popisující změnu klimatu. Jedná se například o GWP (global warming potential), se kterým pracuje (De Meyer, 2015) nebo GHG (greenhouse gases), který ve své práci používá (d'Amore, 2016). Z hlediska celkové udržitelnosti projektu je potřeba se věnovat kombinaci těchto kritérií, tzn. hodnocení ekonomiky a environmentálních dopadů. Proto se významná část publikací soustředí na vícekriteriální optimalizační úlohy. Jedním z příkladů je (Boonmee, 2018), kde se autoři podrobněji zaměřují na likvidaci odpadu po katastrofě. Kritérium zde spočívá v minimalizaci nákladů na likvidaci odpadu a související náklady na minimalizaci negativních dopadů na životní prostředí. Samotná problematika je definovaná pomocí celočíselného lineárního modelu (MINLP-mixed integer linear problem). Úloha je však natolik rozsáhlá, že se nakonec autoři uchylují k heuristickým přístupům. Zajímavou možností při řešení vícekriteriálních úloh popisuje (Wichapa, 2017), který pracuje s fuzzy přístupy. Významným přínosem do této problematiky je také nástroj NERUDA, který byl poprvé zmíněn v článku (Šomplák, 2014).

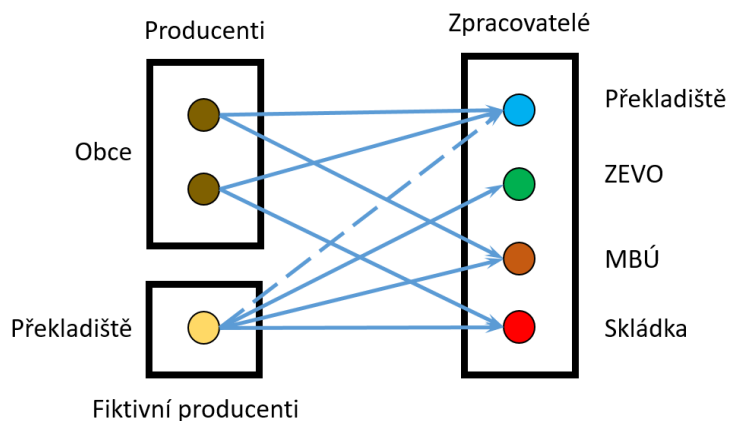
Nástroj NERUDA definuje síťovou optimalizační úlohu, která se svým charakterem řadí do MINLP. Zahrnuje mnoho typů zařízení na zpracování odpadu jako ZEVO, MBÚ, ZLF, skládky, překládací stanice a zároveň umožňuje pracovat s dopravní sítí v podobě silnic i železnic. Celý výpočet nástroje NERUDA vychází z myšlenky, že producent odpadu si vybírá zpracovatele podle nejnižší ceny a zpracovatel nabízí cenu dostačující na splnění stanovené návratnosti investice. Účelová funkce celého nástroje minimalizuje celkové náklady na svoz a zpracování odpadu. Z hlediska kvality vůči ostatním přístupům se nástroj NERUDA pohybuje na vysoké úrovni, a proto je tato práce významně orientována na jeho další rozvoj.

### 2.1.1 Dosavadní výzkum na ÚPI v oblasti dopravních úloh

Důležitou charakteristikou při výpočtu dopravních úloh je samotná cena za dopravu. Ze začátku byla hodnota ceny za dopravu odpadu v nástroji NERUDA odhadnutá na základě zkušeností, tedy konstantní pro každou tunu a kilometr nezávisle na trase. Jedná se o zjednodušení, které do výsledku přináší jistou nepřesnost. Otázkou je, zda je významná, či nikoliv. Podrobně se náklady spojenými s dopravou zabývá (Gregor, 2017). Bere zde v úvahu typy sběrných vozidel (nosnost, spotřeba), možnost překladišť a zahrnuje i intermodální dopravu. Výsledkem jsou ceny za dopravu vztahované ke kilometrovému proběhu vozidla a přepravovanému množství komodity, v tomto případě odpadu. Oproti dosavadnímu přístupu tedy není konstantní cena v Kč/km/t, ale jedná se o proměnnou cenu definovanou zvlášť pro každou trasu.

To vedlo k modifikaci dostupného nástroje NERUDA. Původní verze byla postavena na silniční síti, která má podobu dopravní mapy a veškeré trasy jsou simulovány pomocí úseček. To znamená, že se odpad z hlediska výpočtu může stékat v uzlech a v dalších se opět rozdělovat. Už z této definice vyplývá, že dochází hned ke dvěma problémům.

Prvním je aplikace pokročilých dopravních modelů do nástroje NERUDA. Jelikož není specifikované, po jaké trase se odpad svážel, nelze k ní přiřadit ani zmíněné náklady na dopravu, viz (Šomplák, 2019). Z tohoto důvodu vznikl přepracovaný model NERUDA, který není definován nad reálnou sítí, ale nad sítí bipartitní, viz (Asratian, 1998). Množina uzlů se dá rozdělit na dvě disjunktní podmnožiny zpracovatelů a producentů a veškeré hrany sítě spojují pouze uzly ležící v různých podmnožinách. V případě, že existuje v jednom uzlu zároveň zařízení na zpracování odpadu, PREKL i producent, pak se z původního jednoho uzlu stávají uzly tři, přičemž propojení je možné pouze od producenta ke zpracovateli nebo překladišti. PREKL navíc odpad přeposílá dále, takže vzniká ještě další uzel, který funguje jako fiktivní producent, viz obr. 11.



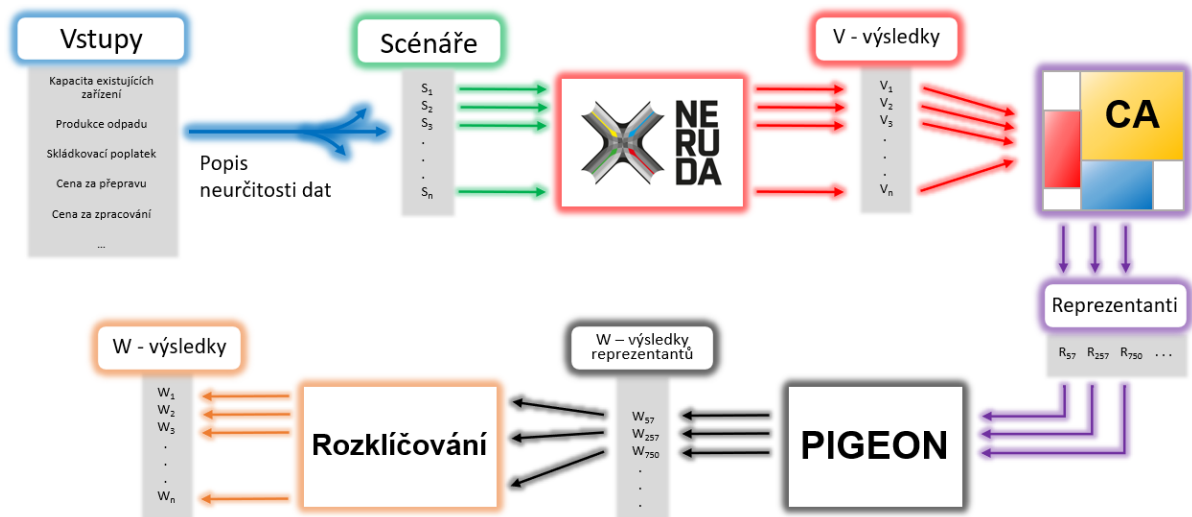
**Obr. 11 Ilustrativní schéma bipartitní sítě nástroje NERUDA**

Výpočet na bipartitní síti může v některých úlohách zapříčinit zvýšení výpočtových nároků na čas, ale může do něj být zahrnuta přesnější informace o nákladech na dopravu, takže poskytuje přesnější výsledky. Otázka zní, jak moc se výsledky budou lišit a jestli je třeba uchýlovat se k náročnějšímu výpočtu. Dle dosavadního výzkumu popsaného v kapitole 4.1.2 je pro některé úlohy tento přístup potřeba. Proto je vhodné zabývat se redukcí výpočtového času. Několik přístupů, jak toho docílit je nastíněno v (Lam, 2011). Jako vhodná se jeví redukce hran, jelikož je jasné, že například příliš dlouhé hrany nebudou využity. Další možností může být rozdělení lokality na menší oblasti, které budou provázány přes okrajové podmínky.



Druhý problém se týká výpočtu ceny pro producenta odpadu. Jak již bylo zmíněno, v průběhu výpočtu se odpad mísí s ostatními toky, které jsou dopravovány po stejné trase, takže ve výsledku není jasné, kde byl původní odpad zpracován a za jakou cenu. Pro tuto úlohu byl vytvořen nástroj PIGEON, který toky odpadu zpětně přiřazuje k producentům (Šomplák, 2016). Jeho využití je ilustrováno ve článku (Šomplák, 2019). Řešení tohoto úkolu je však nejednoznačné, a proto se počítá opakovaně s různými vstupními hodnotami. Stejně tak i původní nástroj NERUDA se pouští opakovaně pro různé scénáře. Pokud by tedy bylo potřeba přiřadit toky odpadu k producentům pro větší množství scénářů, pak úloha velmi rychle výpočtově narůstá. Řešení by mohla poskytnout shluková analýza výsledků ze softwaru NERUDA. Veškeré výsledky by se podle zvolených parametrů rozdělily do skupin, z nichž každá by měla jednoho zástupce, viz (Anderberg, 1973). Takže by výpočet pro nástroj PIGEON byl omezen pouze na několik reprezentativních zástupců shluků.

Pro výpočet shlukové analýzy byl vyvinut v rámci (Onderlička, 2016) nástroj (v obr. 12 označen jako CA – cluster analysis), který umí pracovat s výstupními daty NERUDA. Podle potřeby je možné použít několik druhů předpřipravených typů shlukové analýzy, jako jsou klasické hierarchické přístupy, k-means nebo dokonce přístupy založené na fuzzy logice. Pomocí shlukové analýzy se výrazně sníží počet výsledků a tím se sníží i náročnost jejich zpracování. Hlavním úkolem by potom bylo zpětné rozklíčování výsledků PIGEON a jejich zpětné přiřazení k výsledkům nástroje NERUDA, viz obr. 12.



Obr. 12 Schéma výpočtu přiřazení toků odpadu k producentům<sup>3</sup>

## 2.2 Zpracování odpadu

Poslední zmíněná část OH, kterou se tato práce zabývá, je samotné zpracování odpadu. Jako aktuální téma bylo vybráno zpracování odpadu v podobě jeho energetického využití. Jedná se o problematiku ZEVO zahrnující jeho výstavbu a následný provoz.

ZEVO disponující turbínou uzpůsobenou k dodávce tepla (protitlaková, kondenzační odběrová apod.) se dá definovat jako zařízení s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla (KVET). Jak popisuje (Liu, 2014) nebo i (Bischi, 2014), optimalizace provozu zařízení KVET obvykle vede na úlohu MINLP, jelikož plánování provozu musí obsahovat informace o jednotlivých zařízeních (kotle, turbogenerátory, aj.). Především se jedná o výkonnostní křivky, maximální a minimální přípustné zatížení, možnost odstavení, samotná četnost odstavení apod. Celočíslnost je skryta v binárních proměnných (zapínání/vypínání) a nelinearita se objevuje u výkonnostních křivek. Samotný problém MINLP je těžce

<sup>3</sup> CA snižuje počet V-výsledků pro náročný výpočet PIGEON. PIGEON zpětně přiřazuje toky odpadu k producentům.

řešitelný i pro efektivní optimalizační řešiče jako je například CPLEX, BARON apod. Proto se od problematiky MINLP ustupuje a existuje mnoho technik celočíselného lineárního programování (MILP), které úlohu MINLP převádí na MILP.

Jedním z příkladů, který převádí problém na MILP je (Thorin, 2005). Ve své práci se zabývá návrhem pro dlouhodobou optimalizaci kogeneračních systémů. Jeho přístup je založen na kombinaci MILP s Langrangiovaskou relaxací. Základní model uvažuje systém kotlů, kondenzačních turbín, protitlakých turbín, které jsou buď poháněny párou vyrobenou z uhlí, ropy nebo zemního plynu. Odbyt tepla je zde umožněn v rámci centrálního zásobování teplem (CZT). Účelová funkce představuje celkový zisk, definovaný jako rozdíl příjmů za prodej elektrické energie a nákladů za její nákup, palivo a nákladů na přenos tepla. Pomocí značných zjednodušení v podobě modelování výkonu kotlů a turbín dospěli autoři k reformulaci problému na MILP, který řeší pomocí řešiče CPLEX. Při zvolení délky časového kroku na jednu hodinu se už ale autoři dostávají do problémů s řešitelností, pokud chtějí spočítat období o délce několika měsíců. Ve výsledku tedy přistupují k rozdělení celkového problému na týdenní intervaly s částečným překryvem, které řeší odděleně. Týden byl zvolen také proto, že je to minimální časový úsek, kdy může být zařízení v provozu či odstaveno. Výsledky z předchozího týdne se pak přenášejí na další, kde jsou poupraveny, což vede k tomu, že nalezené řešení nemusí být optimální. Podobný problém s časovou náročností popisuje i (Piacentiono, 2008), který také přistupuje k modelování na hodinové bázi a se svým modelem začíná mít výrazný nárůst výpočetního času pro úlohy zabývající se více než 40 dny. Dalším příkladem je (Lahdelma, 2003), který se soustředí na KVET ve Finsku. Vzhledem ke studenému klimatu je v této zemi vysoká poptávka po teple a v dnešní době už i po elektřině, takže je pro ně KVET velice vhodnou variantou. V tomto článku se opět řeší podobný model na hodinové bázi, kde ovšem není úkolem maximalizovat zisk, ale minimalizovat náklady na provoz. Pro výpočet je použita metoda power simplex (PS) odvozená od klasické simplexové metody, ale využívá speciální strukturu přesně definovanou pro daný problém. Na hodinové bázi počítá také (Rong, 2007). Pracuje s myšlenkou, že cenově efektivní provoz KVET lze naplánovat pomocí optimalizačních modelů. Pomocí různých technik dekompozice lze střednědobý až dlouhodobý plánovací model rozdělit do hodinových modelů, které lze více či méně separátně vyřešit v závislosti na použitém algoritmu. Použité techniky rozkladů zahrnují například dynamické programování, Lagrangianův rozklad, rozklad Dantzig-Wolfe, Bendersova dekompozice, popřípadě heuristické metody. Tyto metody jsou však v článku pouze nastíněny, ale reálně se hodinové modely řeší jednoduše postupně. Efektivní řešení hodinových modelů je důležité, jelikož při změně některých parametrů (např. cena elektřiny) je potřeba problém re-optimalizovat a u dlouhodobých problémů se jedná o tisíce hodinových modelů, které je potřeba přepočítat. Proto se používají různé metody analýzy scénářů, které jsou definovány například různou cenou. Ve zmiňovaném článku se všechny hodinové modely dají matematicky popsat tak, že jsou úlohou lineárního programování nebo MILP. K jejich řešení se používá algoritmus PS. Problematika se týká více zařízení, které už jsou postavené a je snaha optimalizovat jejich provoz. Není tedy potřeba řešit velikost ani typy jednotek v novém zařízení, pouze se optimalizuje provoz stávajících. Navržený algoritmus PS je pro danou problematiku znatelně rychlejší než použití řešiče CPLEX. Takže při reformulaci problému by jeho forma pravděpodobně mohla být použita.

Samozřejmě jsou k dispozici i zdroje, které se nebojí zůstat u problematiky MINLP nebo nemají z charakteristiky problému možnost přejít k MILP. Mezi takové patří například (Beihong, 2006) nebo (Ren, 2008). (Ren, 2008) se zabývá malou kogenerační jednotkou pro samostatnou budovu. Optimalizační modely zmíněné problematiky se dají rozdělit nejen podle linearity, ale i podle simulovaného úseku na krátkodobé a dlouhodobé. Většina doposud zmíněných se řadila ke krátkodobým, kdy se jedná o simulaci provozů pouze v časovém horizontu hodin, dnů či týdnů. Dlouhodobé už mají za cíl simulovat alespoň rok, případně celou životnost provozu zařízení. Podle

časového horizontu se pak může zvolit příslušný časový krok, který lze použít. U krátkodobých lze optimalizovat třeba i na bázi hodin, ale výpočet na bázi hodin pro několik let životnosti provozu už nedává příliš smysl, a hlavně není výpočtově zvládnutelný. Proto se u dlouhodobých modelů volí zpravidla měsíc či rok.

Jedním z takových případů je (Buoro, 2013), který si však problematiku ztížil tím, že ji neřeší pouze z pohledu ekonomiky, ale zavádí do ní i ekologické hledisko. Dostává se tedy na pole vícekriteriálních úloh zahrnující investice i provoz celého zařízení. Jako časový krok je zde zvolen jeden rok. Stejně tak je tomu i u (Fazlollahi, 2012), který ve své práci definuje úlohu MILP, kterou dále rozvíjí a navrhuje její řešení pomocí evolučního algoritmu. Velice vhodně je tu také použit přístup paralelních výpočtů k úspoře výpočetního času. Podobná myšlenka by se dala použít i v případě, kdy je uvažován scénářový přístup (viz kap. 5.6), kde je možné provádět opakované výpočty pro každý z nich a teprve na jejich základě posuzovat finální výsledek. K tomu by mohl dopomoci nástroj vyvíjený na ÚPI společně s ústavem matematiky, který je schopen vhodně rozdělenou úlohu počítat po částech současně na jednotlivých jádrech procesoru. První výsledky tohoto přístupu přináší (Talpa, 2018). (Fazlollahi, 2014) navrhuje na zkrácení výpočtového času použití shlukové analýzy. Uvažuje zde problém optimalizace okresního energetického systému. Hodnocení kvality takového systému vyžaduje odhad investic a odpovídající provozní náklady. Zároveň však musí být na dost velké úrovni detailu, aby mohl zohlednit hodinové, denní či sezónní změny v poptávce po energii. Zmíněná problematika vede na víceletý model, který pracuje na hodinové bázi. Počet proměnných s velikostí úlohy velice rychle roste, a i model charakteru MILP se může snadno stát neřešitelným. Použití typických období poskytuje účinnou alternativu pro snížení počtu proměnných. Zde se zavádí pojem typická omezená období a myšlenka, že rok může být těmito typickými obdobími nahrazen. Může se jednat o dny, týdny, víkendy či měsíce. K výpočtu vhodného časového kroku a jejich počtu používá klasickou metodu k-means, kterou navíc kombinuje s epsilon-optimalizačními technikami. Tento přístup se zdá logický, jelikož rozdělení podle typických časových období (týdny, měsíce) nemusí být z hlediska poptávky vhodný. Místo toho by se mohli vytvořit umělé časové úseky, které by vykazovaly jistou podobnost. Takže shluk sedmi dnů by nemusel představovat týden, ale dny poskládané z celého roku, které jsou si podobné podle zvolených parametrů. Výpočet by pak proběhl pouze pro dané shluky. Chyba tohoto přístupu však přichází s možností odstavení jednotlivých zařízení, jelikož by mohla nastat situace, že model doporučí na jeden den odstavit kotel a na druhý den ho uvažuje jako zapnutý. Proto by byl potřeba důkladnější post-processing, který by mohl být náročnější než původní výpočet.

### **2.2.1 Dosavadní výzkum na ÚPI v oblasti technickoekonomických modelů ZEVO**

Jeden z prvních modelů na ÚPI zabývajících se provozem a investicemi ZEVO, byl publikován v (Touš, 2011). Tato práce se věnuje možnostem integrace ZEVO do existujícího teplárenského systému, který používá jako palivo biomasu a uhlí. Definovaná problematika navazuje na předchozí práci (Touš, 2010), kde byl vytvořen MINLP a u tohoto typu modelu se při řešení zůstalo. Časový krok zde byl zvolen jeden měsíc. Článek (Šomplák, 2012) popisuje model, který se zabývá výstavbou samostatně stojícího ZEVO. Problém definuje pomocí dvoustupňového stochastického programování, kde se časový krok volí jeden měsíc. Výsledný model byl dále rozvíjen a na jeho základě byla provedena případová studie, která je podrobně rozepsána v (Šomplák, 2013). Zde už je značná část práce zaměřena na popis možných scénářů budoucího vývoje. Hlubší problematikou scénářů se zabývá také (Ferdan, 2014).

Integraci ZEVO do existujícího teplárenského systému se zabývá (Putna, 2018), kde je poukázáno na to, že zanedbání týdenních, denních či hodinových vlivů neurčitých parametrů (např. poptávka po teple) může vést k výrazným změnám ve výsledné ekonomice ZEVO. Na základě výzkumu tohoto článku vzniklo porovnání modelů z hlediska časového kroku, viz tab. 2.

**Tab. 2 Výhody a nevýhody modelů v závislosti na časovém kroku (Putna, 2018)**

	<b>Krátkodobé (H, D)</b>	<b>Střednědobé (T, M)</b>	<b>Dlouhodobé (R)</b>
Použitelnost z pohledu zařízení	Zařízení už je v provozu – plánování výroby tepla a elektřiny	Koncepční design zařízení, návrh parametrů kotle, turbín	Koncepční design zařízení, návrh kapacity, odhad investičních nákladů
Časový krok (životnost zařízení - 25 let)	H: $10^5$ (8760x25) D: $10^3$ (356x25)	T: $10^3$ (53x25) M: $10^3$ (12x25)	R: $10^1$ (1x25)
Výhody	Bere v úvahu aktuální poptávku po energii, kooperaci zdrojů, minimální výkony zdrojů energie, účinnost závislou na zatížení, odstávku atd.	Uvažuje změny v závislosti na ročním období.	Nenáročný výpočet.
Nevýhody	Rozsáhlá vstupní data zahrnující veškeré podrobnosti (např. vliv počasí), výpočtově náročná úloha.	Částečné zanedbání v rámci denních změn.	Obsahuje velké zanedbání důležitých faktorů.

Pozn.: H – hodiny, D – den, T – týden, M – měsíc, R – rok

Další práce, která se věnovala integraci ZEVO do existujícího teplárenského systému, je (Janošťák, 2016a). Kde byl vytvořen model přímo pro jednu uvažovanou lokalitu. I přes značné zjednodušení byl model natolik složitý, že musel být řešen pomocí heuristických algoritmů.

Z hlediska řešerše je tedy zřejmé, že k řešení dané problematiky je možnost vybrat z více metod. Dle tab. 2 by se ideální model pohyboval přesností v oblasti krátkodobého plánování, ale zároveň by byl použitelný i pro dlouhodobé plánování, což je výpočtově neúnosné. Cílem této práce je tedy ověřit, zda kombinace zmíněných přístupů a zjednodušení umožní popsanou problematiku řešit.

### 3 CÍLE PRÁCE

Prvním tématem dizertační práce je řešení dopravních úloh. Provedená rešerše prokázala, že kvalitní přístup k řešení těchto úloh poskytuje nástroj NERUDA vyvinutý na ÚPI. Po jeho důkladné diagnostice se i on dopouští některých zjednodušení, aby dosáhl řešitelnosti v přijatelném čase.

Jedním je zmíněná konstantní cena za dopravu odpadu mezi producenty a zpracovateli. Aby bylo možné řešit úlohu s variabilní cenou, je potřeba využít variantu nástroje NERUDA s bipartitní dopravní sítí. Tato práce navrhuje modelovou úlohu pro obě varianty nástroje NERUDA (reálná vs. bipartitní dopravní síť), na které ukazuje rozdílnost výsledků. Porovnává jejich významnost a modeluje případy, ve kterých k ní dochází.

Druhým je analýza výsledků. Protože se NERUDA zabývá scénářovým přístupem, je potřeba analyzovat tolik výsledků, kolik je stanoveno scénářů. Jejich počet se může pohybovat v řádech stovek až tisíců. Vzhledem k počtu proměnných, jakých může úloha nabývat, je velmi těžké výsledky interpretovat. Tato práce přichází s řešením využívajícím shlukovou analýzu. Veškeré výsledky se podle zvolených kritérií rozřadí do několika skupin a může se pracovat pouze s reprezentanty těchto skupin, kterých je podstatně méně. Práce představuje modelovou úlohu, na které je představeno krok po kroku využití nástroje CAO (Cluster Analysis Onderlička) při shlukové analýze a v závěru této problematiky poukazuje na jistá omezení v případě jejího využití. Prvotní verze nástroje CAO byla vyvinuta v rámci práce (Onderlička, 2016).

Druhým tématem dizertační práce je vývoj optimalizačních modelů pro podporu strategického plánování (výstavby) a řízení provozu nových i stávajících ZEVO. Jedná se o vysoce nákladné projekty, a proto není jednoduchá jejich realizace. Potenciální investor vstupuje do rizika a požaduje odpovídající zhodnocení. Prvním úkolem v této práci je popis provozu ZEVO včetně zahrnutí ekonomických hledisek s cílem vypočítat zhodnocení celého projektu za dobu jeho životnosti. Doba životnosti se běžně pohybuje mezi 10 až 30 lety. Za takovou dobu se mohou podmínky provozu a stav trhu značně měnit a je potřeba tyto změny brát v úvahu. Tzn. je třeba jejich zahrnutí do optimalizačních modelů. Základem je vytvoření podrobného technickoekonomického modelu ZEVO, který po implementaci do vhodného softwaru bude řešitelný. Dosavadní výzkum na tomto poli problematiky ukázal, že úloha je značně rozsáhlá a bez vhodného zjednodušení či upravení úlohy bude pravděpodobně neřešitelná, případně nebude řešitelná v přijatelném čase. Někteří autoři zmínění v rešerši možná zjednodušení úlohy představili. Z pohledu výsledků se jeví tato zjednodušení jako příliš radikální.

Tato práce si stanovila za cíl vytvořit model, který bude pracovat s minimem zjednodušení, bude řešitelný a zároveň bude dostatečně průhledný z pohledu výsledků. Modelová úloha ve formě MINLP se rozdělí na menší dílčí úlohy MILP, které jsou mnohem snadněji řešitelné, a navíc se budou dát řešit paralelně, čímž dojde k výraznému snížení výpočtové náročnosti. Celkový výsledek je pak definován sjednocením řešení dílčích úloh.

Ze všech představených témat vyplývají konkrétní dílčí cíle práce:

- Analýza současných modelů na ÚPI
  - lokační a svozové modely (NERUDA, PIGEON) (kap. 4),
  - technickoekonomický model ZEVO a dalšího tepelného zdroje (kap. 5).
- Následná úprava modelu a implementace do vhodného softwaru.
- Nalezení přístupů vhodných k jejich řešení.

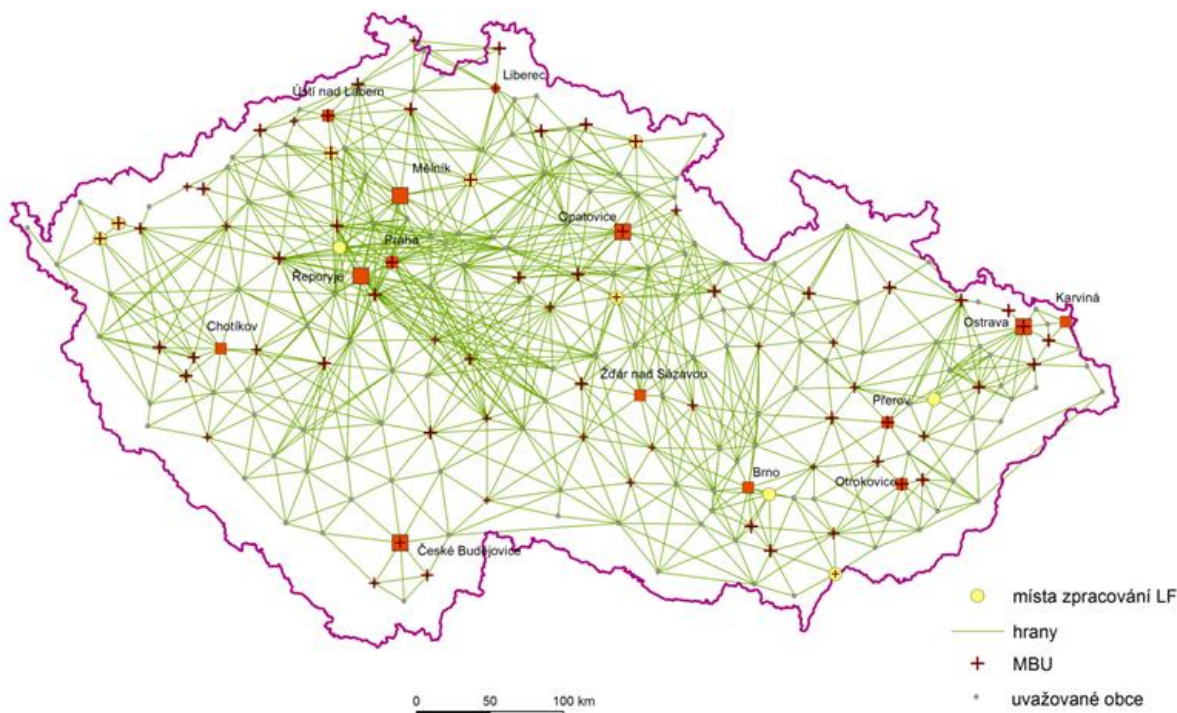
## 4 REDUKČNÍ TECHNIKY VÝPOČTOVÝCH NÁSTROJŮ DOPRAVNÍCH ÚLOH

### 4.1 Redukce dopravní infrastruktury

V této kapitole je věnována pozornost snížení výpočtové náročnosti pomocí redukce dopravní infrastruktury. Princip je ilustrován na optimalizačním nástroji NERUDA, avšak samotná metodika přístupu je obecná a přenositelná na libovolné dopravní úlohy.

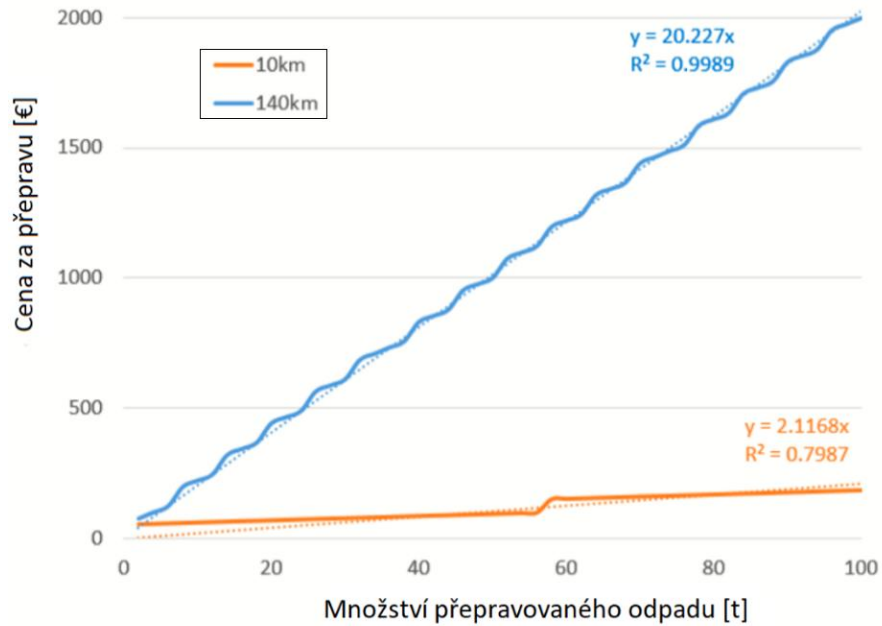
#### 4.1.1 Současný stav výpočtového nástroje NERUDA

Optimalizační nástroj NERUDA je jedním z významných softwarů věnující se dopravním úlohám OH. V rešeršní části bylo naznačeno, že mnoho zpracovatelských úloh se potýká s výpočetní náročností. Ve velké míře je problém řešen zjednodušováním modelů dopravních nákladů. Podobně je to řešeno i v nástroji NERUDA. Dopravní náklady jsou definované jako konstantní hodnota za přepravu jedné tuny komodity (odpadu) na vzdálenost jednoho kilometru. Dále se označuje tato konstanta jako jednotkové konstantní náklady (JKN). Díky tomuto předpokladu je možnost modelovat dopravní infrastrukturu pomocí orientovaného ohodnoceného grafu, tzv. reálné sítě. Příklad dopravní infrastruktury pro celou ČR bez zobrazení orientace ukazuje obr. 13.



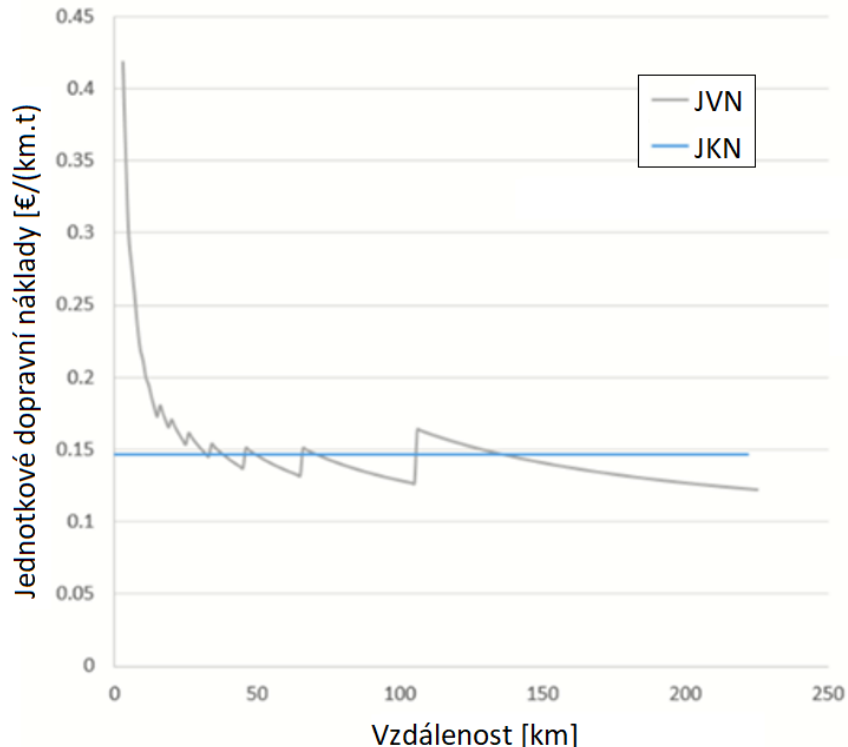
**Obr. 13 Reálná síť silniční infrastruktury ČR**

Dopravní náklady ale nezávisí pouze na přepravované vzdálenosti a množství komodity, ale odvíjí se od celkové délky dopravní trasy a dalších aspektů jako je např. délka úseku zpoplatněného mýtem. Tuto situaci je nejlépe možno ilustrovat pomocí výsledků pokročilých dopravních modelů zobrazených na obr. 14 a z něj vycházejícího obr. 15.



**Obr. 14** Dopravní náklady v závislosti na celkové vzdálenosti trasy

Na obr. 14 jsou zobrazeny dopravní náklady související s převozem SKO na trase o délce 10 km a 140 km společně s jejich lineárním proložením. Pro jednoduchost se uvažuje proložení definované pouze směrnici bez absolutního členu. Křivky vycházejí z výsledků pokročilých dopravních modelů definovaných v (Gregor, 2019). Na základě těchto křivek je možnost odvodit tzv. jednotkové variabilní náklady (JVN) na přepravu, viz obr. 15.



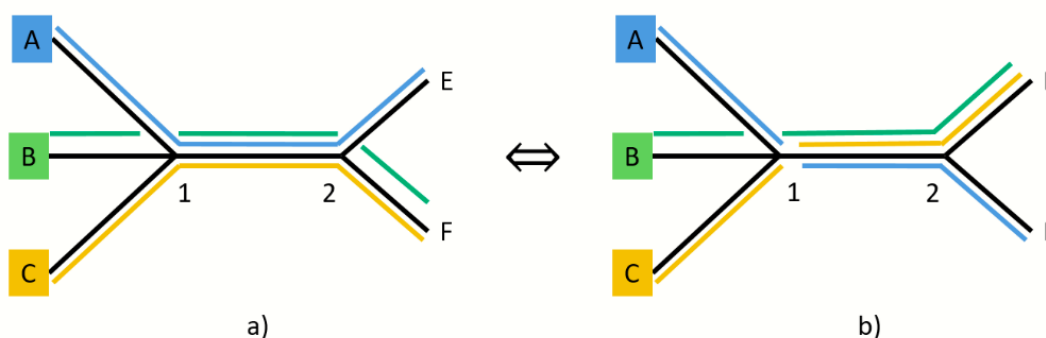
**Obr. 15** Srovnání variabilních a konstantních jednotkových nákladů

Z obr. 15 lze vyčíst, že JVN se snižují s celkovou vzdáleností přepravní trasy. Jednotlivé skoky v grafu jsou způsobeny definovanou pracovní dobou, omezeným počtem vozidel, typem provozu

(dvousměnný, třisměnný) apod. V případě přepravy vyššího množství odpadu na velkou vzdálenost je tedy nutné rozšířit vozový park o další vozidlo (vyšší investice) nebo počítat s delší pracovní dobou, jelikož vozidlo bude muset jet dvakrát. Obě tyto varianty se promítnou na výsledných jednotkových dopravních nákladech.

Pro porovnání je do obr. 15 implementována průměrná hodnota JVN (modrá úsečka). Ta se přibližně shoduje s expertním odhadem JKN. I přes tento fakt, zůstává otázkou, jak velkého zkrácení výsledku se díky zmíněným zjednodušením dosáhne a zda budou pro danou úlohu přijatelné, či nikoli.

Ke zjištění odpovědi bylo nutno obohatit nástroj NERUDA o JVN. Využití JVN vyžaduje informaci o celkové vzdálenosti trasy, kterou nelze na základě reálné sítě dopravní struktury získat. Vychází to z problematiky tzv. stékání přepravované komodity, viz obr. 16.



**Obr. 16 Stékání komodity**

Obr. 16 znázorňuje tři producenty komodity (A, B, C), kteří přepravují komoditu ke konečnému zpracovateli (E, F). Jakmile dojde v bodě 1 k seskupení všech tří toků a následnému rozdělení v bodě 2, tak se ztrácí informace o původním vlastníkovi komodity. Pokud skončí u zpracovatelů stejné množství komodity, tak z pohledu účelové funkce nástroje NERUDA jsou situace a) a b) ekvivalentní.

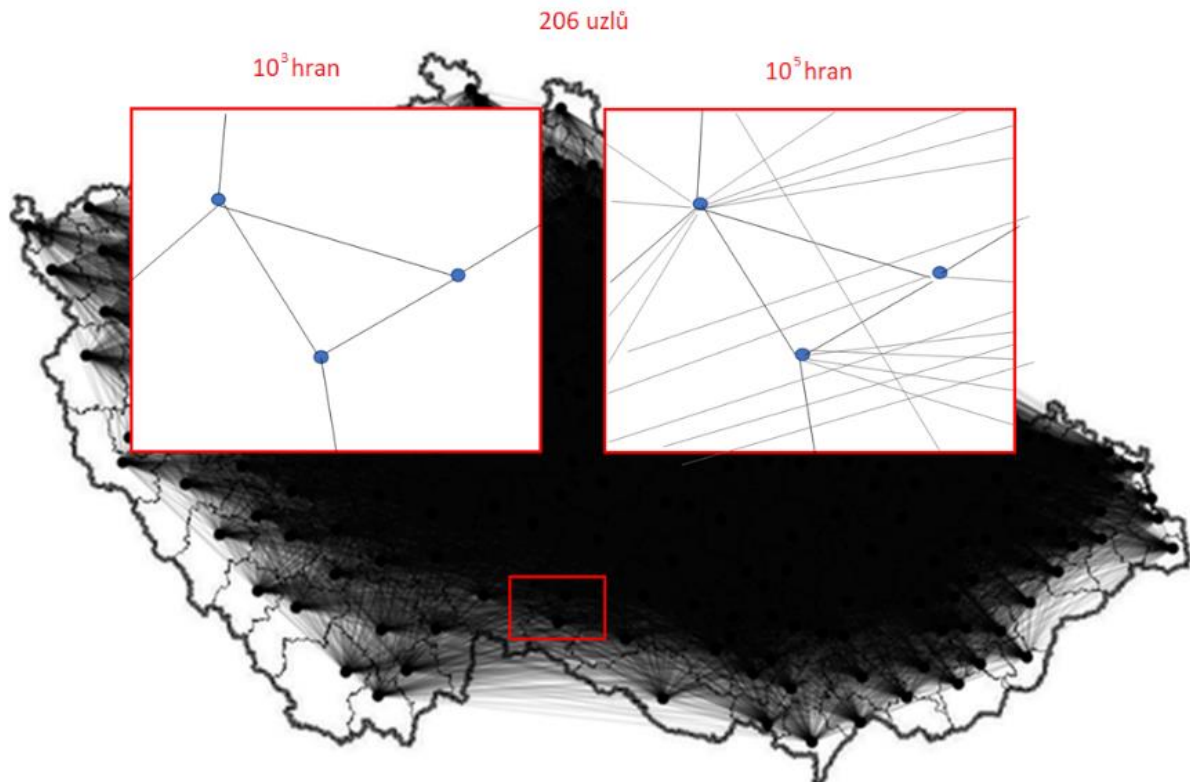
Přístup s reálnou sítí eviduje vždy pouze směr toku komodity a její množství na aktuální hraně. Z pohledu dopravních nákladů urazí zelená komodita v případě a) trasu B-F. Pro tuto trasu by měly být definovány JVN. Dosavadní přístup však pracuje pouze s informací, že zelená komodita urazila trasu B-1, pak směs veškerých komodit urazila trasu 1-2 a nakonec směs komodit (žlutá, zelená) urazila trasu 2-F. Místo, aby se pro každou komoditu spočítaly JVN, lze spočítat JVN pouze pro přímé úseky, ze kterých se celková trasa skládá. Dopravní náklady by byly určeny dobře pouze pro komoditu, která by byla přepravovaná po přímém úseku (Šomplák, 2019). Proto byla definována nová síť popisující dopravní infrastrukturu. Síť, ve které jsou všechny trasy modelovány jako přímé úseky. Jedná se o bipartitní síť.

Bipartitní síť je zkonstruována tak, aby existovala pro každého producenta komodity jedinečný přímý úsek ke každému spotřebiteli. Z podstaty popisu je zřejmé, že bipartitní síť bude obsahovat mnohem větší počet hran. Grafické znázornění bipartitní sítě pro ČR (206 ORP) a 100 možných zpracovatelů je na obr. 17. Částečně jsou přes mapu bipartitní sítě umístěny dva různé výřezy. Oba znázorňují stejnou oblast, ale na prvním (vlevo) je zobrazeno propojení uzlů reálné sítě a na druhém (vpravo) síť bipartitní.

Počet hran sítě je úzce spjat s výpočetní náročností úlohy. Pro rozsáhlé dopravní úlohy by mohlo dojít u tohoto přístupu k výpočetním komplikacím v podobě neřešitelnosti samotné úlohy, případně vysokého výpočtového času. Z hlediska výpočtu je vhodné analyzovat situace, kdy je výhodnější použít



bipartitní síť a kdy reálnou. Z tohoto důvodu byla vytvořena testovací úloha, která pomůže definovat vhodnost použití dané sítě.



**Obr. 17 Bipartitní síť silniční infrastruktury ČR ( $10^5$  hran) vs. původní reálná síť ( $10^3$  hran)**

#### 4.1.2 Modelová dopravní úloha

Úloha byla definována na silniční síti ČR. Zároveň byl však kladen důraz na obecnost, takže výsledky by měly být použitelné i na jiné územní oblasti. Pro účely dalšího vysvětlování se NERUDA nad reálnou sítí bude označovat jako úloha KON (dopravní náklady počítány na základě JKN) a nad bipartitní sítí jako úloha VAR (dopravní náklady počítány na základě JVN). Úloha VAR poskytuje přesnější výsledky, ale pokud se nebudou výrazně lišit od výsledků úlohy KON je snaha zůstat u ní kvůli výpočtovému času.

##### 4.1.2.1 Definice dopravní sítě

Úloha je motivována nakládáním s SKO v ČR. Síť ČR disponuje 206 ORP, u kterých se předpokládá produkce komodity. V tomto případě se jedná o SKO. Ve zvolených uzlech sítě jsou uvažována zařízení na zpracování SKO (např. ZEVO, skládka, MBÚ). Pro účely testování se jednalo pouze o jeden typ zařízení. Suma kapacit všech zařízení byla volena v rozmezí 1 000 – 5 000 kt za rok. Byly vytvořeny 3 varianty rozmístění zařízení a jejich kapacity:

1. Všechna zařízení mají přibližně stejnou kapacitu.
2. V síti je mnohem více zařízení s malou kapacitou oproti zařízením s velkou kapacitou.
3. V síti je mnohem více zařízení s velkou kapacitou oproti zařízením s malou kapacitou.

Také byla stanovena hustota zařízení v síti. Vždy bylo zvoleno určité procento z celkového počtu uzlů, které definovalo počet zařízení. Toto procento nabývalo hodnot 1, 5 a 9 %. Rozmístění zařízení bylo definováno náhodně. V každém uzlu sítě je uvažován producent sledované komodity. Celková produkce dané komodity byla volena jako procentuální část z celkové kapacity všech zařízení. Byly uvažovány hodnoty 10, 40 a 70 %. Stejně jako u kapacit byly uvažovány 3 varianty sítě producentů:

1. Všichni producenti vyprodukují přibližně stejné množství komodity.

2. V síti je několik velkých producentů a mnoho malých.
3. V síti je několik malých producentů a více velkých.

Důležitým faktorem pak byla cena na bráně (cena, kterou si účtuje zařízení za zpracování odpadu) jednotlivých zařízení. Pro tyto účely byla cena generována z normálního rozdělení se střední hodnotou 2 000 Kč a směrodatnou odchylkou 100, 300, 500 Kč. V poslední řadě se měnila průměrná cena za přepravu 1 tuny odpadu na jeden kilometr. Jakožto klíčový parametr u ní bylo stanoveno 5 úrovní, a to 2, 15, 30, 60, 100 Kč/t/km. Společně s proměnnými parametry náhodnosti pro zařízení a producenty bylo vytvořeno 14 580 různých vstupních datových sad pro danou úlohu. Různé kombinace vstupních dat se dále budou označovat jako scénáře.

Na takto definované síti se jedná o úlohu FLP, kde veškerá zařízení mají pevně stanovenou kapacitu a cenu za zpracování. Optimalizuje se celková cena za dopravu a zpracování, kde jako hlavní neznámá figuruje množství zpracovaného odpadu v jednotlivých zařízeních.

#### 4.1.2.2 Dílčí výsledky

Pro všechny scénáře definované výše byla spočítána úloha KON a VAR. Výsledkem každé úlohy je celková cena za dopravu, celková cena za zpracování, informace o tom, v jakém zařízení odpad skončil a kolik ho bylo přepravováno na jaké hraně sítě.

Celkový počet proměnných úlohy VAR byl podle předpokladů vyšší než u KON a stejně tak i časová náročnost výpočtu, viz tab. 3. Výpočet byl proveden na PC s 64bitovým operačním systémem Win10, 8jádrovým procesorem o frekvenci 3,4 GHz a paměti RAM 16Gb. Optimalizační software byl GAMS (Generalized Algebraic Modeling System). Jako řešič byl využit CPLEX.

**Tab. 3 Počet proměnných a časová náročnost výpočtu modelů pro testovací úlohu**

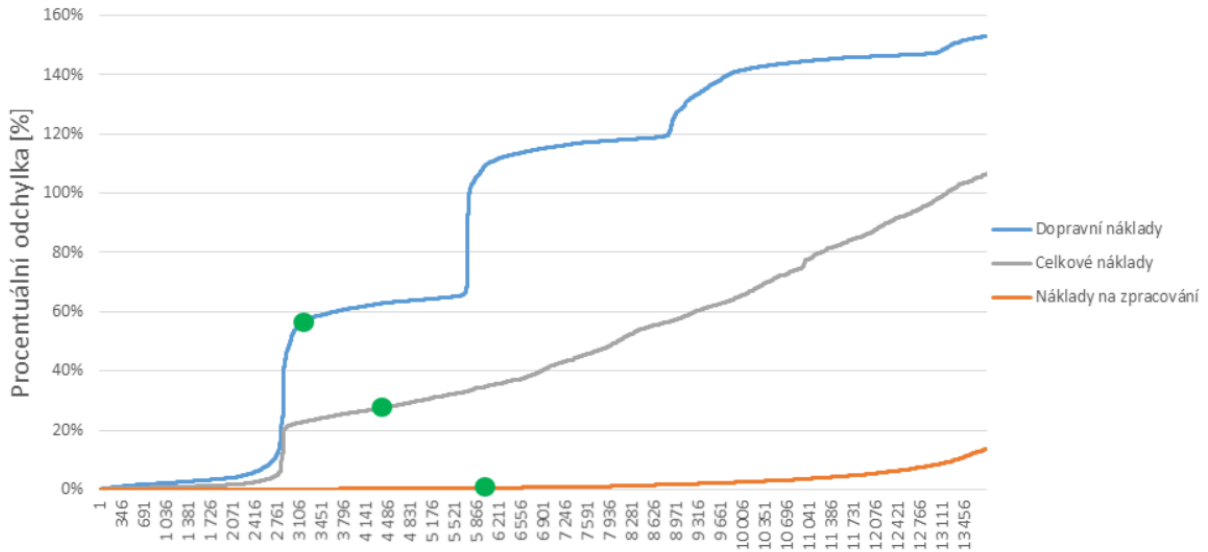
Model	Počet proměnných [-]	Čas vytváření modelu [ms]	Výpočetní čas [ms]	Celkový čas [ms]
KON	10 653	58 475	387	58 862
VAR	128 137	391 265	1 211	392 476

Celkový výpočetní čas se skládá z času potřebného na vytváření modelu a času samotného výpočtu. Pod pojmem vytváření modelu je myšleno zpracování rovnic do vhodného formátu pro výpočet. Tento krok, stejně tak i jako samotný výpočet, provádí automaticky software GAMS. Z pohledu náročnosti výpočtu se jeví varianta KON jako vhodnější, ale výpočtová náročnost není jediným parametrem, podle kterého je vhodné se rozhodovat. Nejdůležitějším parametrem je samozřejmě kvalita výsledků.

Odlišnost výsledků obou přístupů se dá kvantifikovat z několika pohledů. Jedním z nich je posuzovat rozdíly z hlediska celkové ceny za dopravu, zpracování či jejich součtu. Proměnné, popisující odlišnost přístupů, jsou stanoveny pomocí následujícího vztahu

$$R = 2 \cdot \frac{|T^{KON} - T^{VAR}|}{T^{KON} + T^{VAR}} \quad (2)$$

Proměnná  $T^{KON}$ , resp.  $T^{VAR}$ , symbolizuje dopravní náklady, náklady na zpracování či celkové náklady při použití modelu KON, resp. VAR. Zobrazení této proměnné pro jednotlivé celkové ceny je zobrazeno na obr. 18. Hodnoty odchylek v grafu jsou seřazeny vzestupně, osa x je zde pouze pro znázornění počtu scénářů. Ve vertikálním směru si scénáře neodpovídají, což je demonstrováno zobrazením konkrétního scénáře na všech křivkách pomocí zeleného bodu.



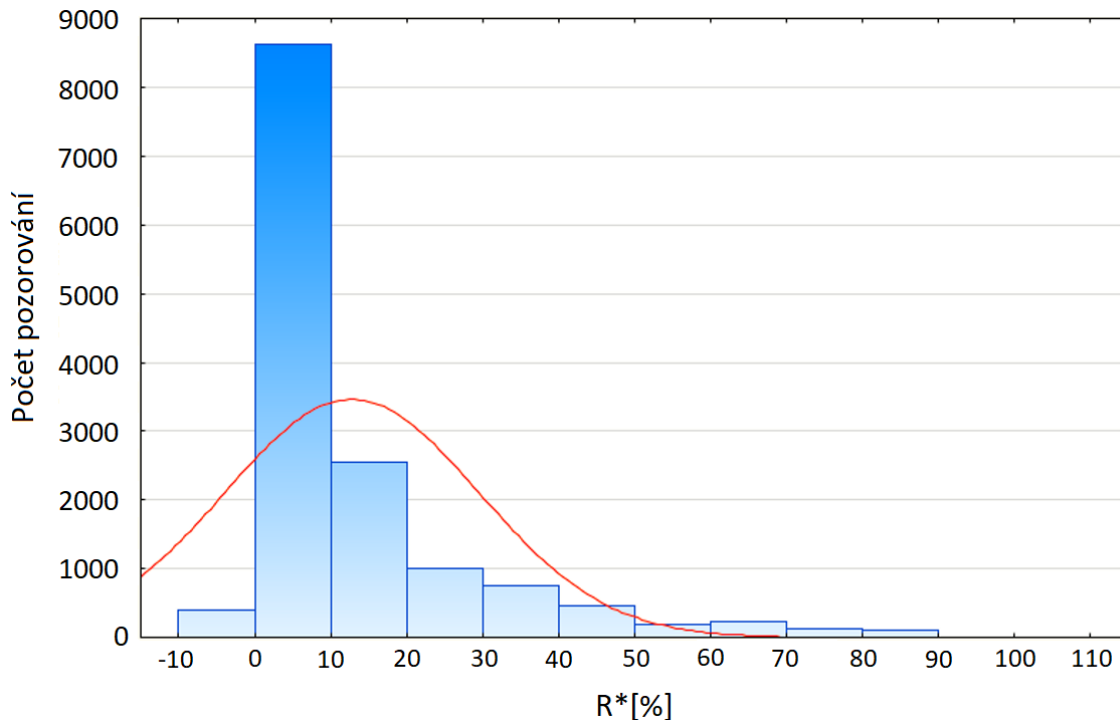
Obr. 18 Procentuální odchylka modelů nákladů KON a VAR

Je pochopitelné, že rozdílný přístup modelů KON a VAR k definování ceny za dopravu se nejvíce projeví v dopravních nákladech. Oproti tomu rozdíl v nákladech na zpracování je pozvolného charakteru a pro téměř 95 % případů se pohybuje pod 10 %. Pokud tedy model cílí hlavně na celkové náklady za zpracování, pak je model KON vhodnou variantou. Pouze náklady za zpracování ani dopravní náklady samostatně neposkytují komplexní informaci o problematice. Jako vhodné kritérium se jeví celkové náklady, které však v některých případech vyžadují využití komplikovanějšího modelu VAR. Přesná shoda nastala pouze v 17 % případů. Jednalo se o případy, kdy byla nízká hodnota jednotkových dopravních nákladů. V případech, kdy cena dopravy roste, začíná být rozdíl markantnější. Je tedy nutné přesně stanovit metodiku, která určí, pro jaké případy je možnost použít výpočetní model KON a snížit tak časovou náročnost.

Z pohledu lokální optimalizační úlohy není ani jeden ze zmíněných parametrů postačující. Pro porovnání odlišnosti modelů byla vytvořena další porovnávací proměnná  $R^*$ , která definuje, jak se modely lišily v rámci toho, v jakém zařízení byl odpad zpracován. Výpočet pro jednotlivý scénář vypadá následovně:

$$R^* = \frac{1}{|I|} \sum_{i=1}^I \frac{|X_i^{KON} - X_i^{VAR}|}{X_i^{KON} + X_i^{VAR}}, \quad (3)$$

kde  $X_i^{KON}$ , resp.  $X_i^{VAR}$ , je množství odpadu, které skončilo v zařízení  $i$  pro model KON, resp. VAR, a  $I$  je množina všech zařízení ( $|I|$  je mohutnost množiny  $I$ ). Pokud  $R^*$  nabývá nízkých hodnot, není potřeba rozlišovat mezi výsledky modelů KON a VAR. Lokalizace zpracování SKO se téměř neliší, ale hodnota účelové funkce se samozřejmě lišit může. V případě, že  $R^*$  nabývá vyšších hodnot, pak by se mělo přistoupit k výsledkům z modelu VAR. Histogram na obr. 19 ukazuje, že v některých scénářích se výsledky modelů liší téměř o 100 %. V těchto případech je nevhodné použít model KON.



**Obr. 19** Procentuální rozdíl  $R^*$  pro jednotlivé scénáře

Výsledky naznačují, že procentuální odchylka  $R^*$  se v téměř 80 % případů pohybuje pod úrovní 20 % a v 62 % se pohybuje dokonce pod úrovní 10 %. Sloupec histogramu od -10 do 0 zobrazuje čisté nuly, tedy případy, kdy modely KON a VAR byly z pohledu  $R^*$  totožné (2,7 %). Pro tyto scénáře je tedy KON model zcela dostatečný.

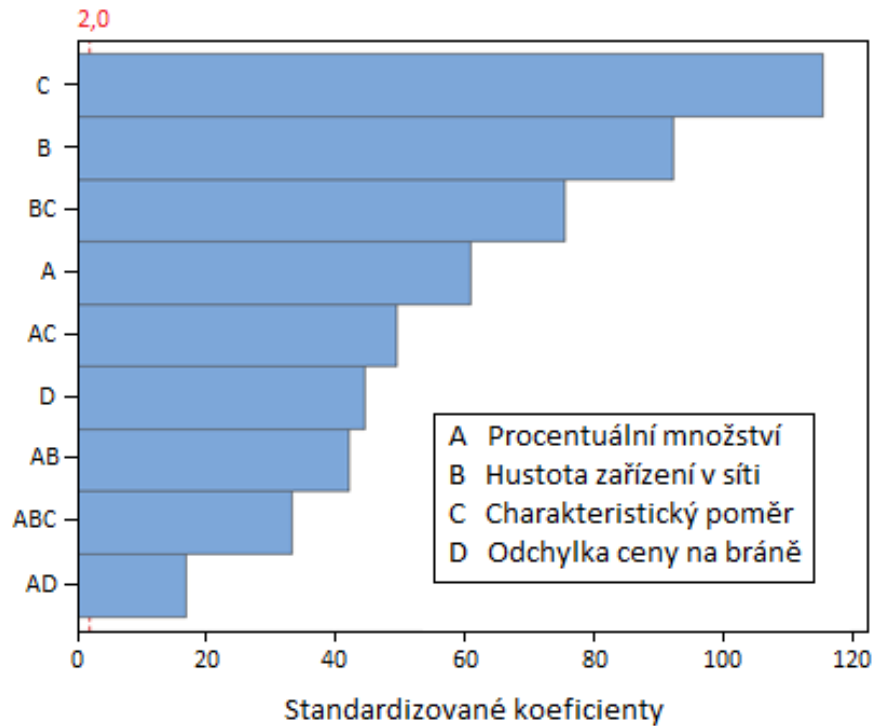
Dosavadní výzkum na poli redukce výpočetní náročnosti poukázal na fakt, že pro některé zpracovatelské úlohy, nebo přesněji pro některé okrajové podmínky úlohy, není potřeba zabývat se složitými dopravními modely a je možné přejít ke konstantní ceně za dopravu na reálné dopravní síti, která neobsahuje extrémně velké množství hran. Volba složitějšího modelu nebude mít vliv na rozmístění většiny zařízení.

Cílem této práce je poskytnout doporučení vhodného modelu dle hodnoty  $R^*$  ještě před výpočtem. Z tohoto důvodu byl vytvořen tzv. charakteristický poměr scénáře  $C$ , jehož výpočet je definován pomocí následujících vztahů

$$F_i = \frac{\varphi_i \cdot G_i}{\sum_{i=1}^I G_i}, \quad (4)$$

$$C = \frac{s(E)}{\varphi_{tra}}, \quad (5)$$

kde  $\varphi_i$  je cena na bráně  $i$ -tého zařízení,  $G_i$  je kapacita  $i$ -tého zařízení, tedy  $F_i$  bude pro další účely označováno jako korigovaná cena na bráně. Dále  $s(F)$  je směrodatná odchylka korigovaných cen na bráně a  $\varphi_{tra}$  je cena za dopravu 1 tuny komodity na vzdálenost 1 km. Z definice jasně vyplývá, že nemůže popisovat veškerou charakteristiku scénáře, takže nelze odhadnout  $R^*$  jen s tímto parametrem. Pro odhad bylo proto použito i surových parametrů, které byly v předchozím textu popsány jako parametry definující síť, viz začátek kapitoly 4.1.2. Regresní model parametru  $R^*$  vznikl na základě faktorové analýzy těchto parametrů. Obr. 20 zobrazuje Paretův graf pro významné parametry.



**Obr. 20** Paretův graf standardizovaných koeficientů modelu odchylky D

Faktorová analýza předpokládá, že veškeré parametry do ní vstupující nebudou vzájemně korelované, což bylo testováno v programu STATISTICA pomocí Spearmanova koeficientu pořadové korelace, který zobrazuje následující tabulka. V tab. 4 i obr. 20 už jsou uvedeny pouze parametry doporučené faktorovou analýzou. Nejvyšší hodnoty korelace nepřesahují hodnotu 0,4, resp. nejsou nižší než -0,4, což je pro použití v daném modelu akceptovatelné.

**Tab. 4** Spearmanovi korelační koeficienty

	A	B	C	D
A	1,000000	0,009375	-0,004200	0,000000
B	0,009375	1,000000	-0,209347	0,000000
C	-0,004200	-0,209347	1,000000	0,038811
D	0,000000	0,000000	0,038811	1,000000

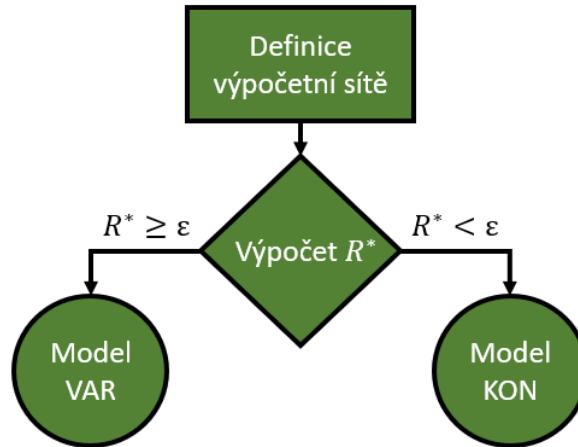
Nejlepší dosavadní model difference  $R^*$ , který se podařilo vytvořit, dosahoval koeficientu determinace 0,64, popisoval tedy 64 % z celkové variability. Tato hodnota by pravděpodobně mohla být zlepšena použitím metod strojového učení, např. neuronových sítí.

Dosavadním výzkumem se tedy prokázala závislost výsledků na zvoleném modelu NERUDA (VAR, KON). Byl vytvořen regresní model na základě vlastností zvolené sítě úlohy, ze kterého plyne vztah (6).

$$\begin{aligned}
 R^* = & -9.77 + 0.13066 \cdot A + 1.8412 \cdot B + 0.03102 \cdot C + 0.03682 \cdot D - \\
 & - 0.02224 \cdot A \cdot B - 0.000222 \cdot A \cdot C - 0.000352 \cdot A \cdot D + \\
 & + 0.09648 \cdot B \cdot C - 0.001013 \cdot A \cdot B \cdot C.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Pro podobné úlohy je tedy vhodné řídit se před jejich samotným řešením rozhodovacím diagramem, viz obr. 21. Prvním úkolem je definice výpočetní sítě. Ta zahrnuje rozmístění jednotlivých uzlů, zařízení, jejich kapacitu apod. Díky těmto datům lze určit parametry sítě ( $A, B, C, D$ ) a dopočítat  $R^*$  ze vztahu (6). Následuje velmi důležitý krok, a to určit, zda je hodnota  $R^*$  dostatečně malá, aby postačoval pro

výpočet modelem KON. V diagramu (obr. 21) je to symbolizováno pomocí hraniční hodnoty  $\varepsilon$ . Její hodnota se může pro různé úlohy výrazně lišit. V případě, že byly údaje o výpočetní síti definovány na základě ne příliš přesných dat, pak i výsledky budou nepřesné, a to pro variantu KON i VAR. V tomto případě je tedy možné ponechat  $\varepsilon$  na vyšší úrovni. Pokud je však definice sítě provedena velice kvalitně, pak je vhodné ponechat  $\varepsilon$  spíše nižší, aby se tato kvalita promítla i do finálních výsledků NERUDA.



Obr. 21 Rozhodovací strom pro výběr vhodného modelu

Dosavadní přístup se však dá využít pouze v případě, že všechny parametry sítě jsou známy. Tedy nelze použít pro úlohy, které pouze uvažují o výstavbě nových zařízení. Výpočet pro předem nedefinované sítě je v praxi velmi často vyžadovaný. Právě analýza stavu, kdy nejsou přesně definovány parametry, otevírají možnosti dalšímu výzkumu, který je již nad rámec této práce.

## 4.2 Redukce výpočtových scénářů

V této kapitole se vychází z výpočtů softwaru NERUDA, který uvažuje klasickou síť (viz obr. 13). V této verzi je stanovena jednotková cena za km nehledě na délku trasy (JKN). V některých situacích se ukázalo, že zvolený přístup je zcela postačující a má proto smysl zavést takové zjednodušení. Podrobně byla problematika popsána výše u obr. 13. Bipartitní síť se v této části neuvažuje.

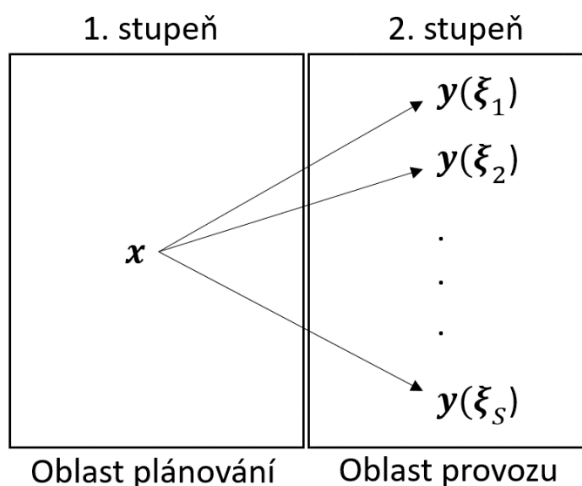
Předchozí text se zaměřil na první dva klíčové problémy výpočtového nástroje NERUDA, a to problém stékání komodit, viz popis u obr. 16, a výpočtovou náročnost. Tato kapitola se věnuje převážně problematice zpracování výsledků. Jak již bylo zmíněno v úvodu této práce, tak výsledek výpočtového nástroje NERUDA zahrnuje optimální rozvoz dané komodity, v tomto případě odpadu, jejího zpracování a z toho plynoucí ceny na bráně jednotlivých zpracovatelských zařízení. Údajů, které jsou důležitými charakteristikami, vstupujících do modelu je mnoho a nelze s jistotou určit jejich správnou hodnotu. Ať už z důvodu nedostatku dosavadních dat nebo nejistoty budoucího vývoje. Proto se přechází ke scénářovému přístupu, kdy se vstupní hodnoty pohybují v definovaném rozmezí, případně se uvažují jako několik diskrétních hodnot. To vede na problém, který lze řešit z pohledu optimalizace dvěma základními způsoby, a to přístupem „Here-and-Now“ (HN) nebo „Wait-and-See“ (WS). Vstupní hodnoty se potom označují jako náhodná veličina.

Přístup WS čeká na realizaci náhodné veličiny  $\xi$  (poplatek za skládkování, poptávka po teple, kapacita nových zařízení apod.) a až po jeho realizaci teprve reaguje. To znamená, že se při výpočtu předpokládá znalost budoucího vývoje.

Oproti tomu se HN snaží nalézt řešení, které bude vzhledem ke všem možným realizacím nejrobustnější. Ať tedy nastane jakákoliv možná realizace, tak v konečném důsledku by mělo takto

vzniklé rozhodnutí poskytovat rozumné řešení. Avšak pro konkrétní realizaci  $\xi$  nemusí být v žádném případě nejlepší.

V případě, že se náhodná veličina  $\xi$  dá modelovat pomocí diskretní náhodné veličiny s konečným počtem realizací, což je u řešené problematiky docela běžné, tak se problém nazývá scénářový. Realizace náhodného vektoru  $\xi_s$  potom definuje jednotlivé scénáře  $s$ . Při aplikaci na problém výstavby ZEVO lze tento postup ilustrovat pomocí obr. 22.

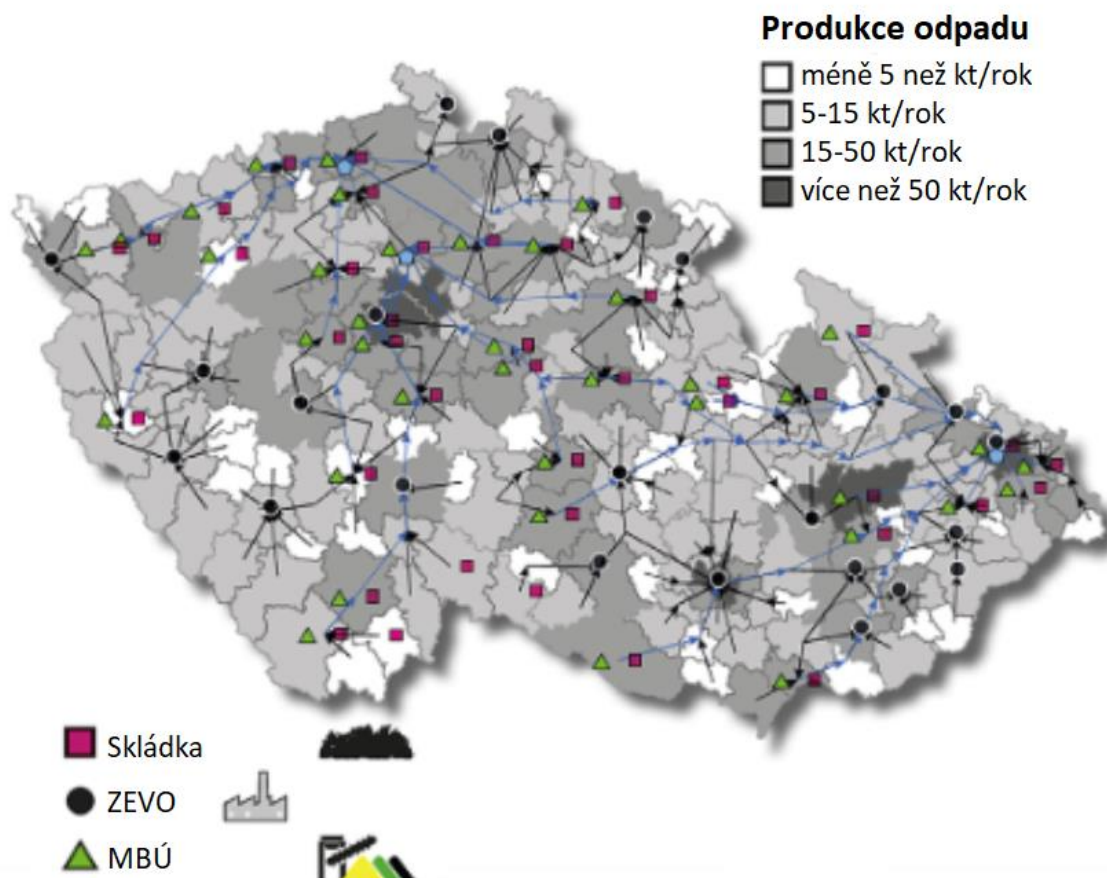


**Obr. 22 Princip dvoustupňového stochastického programování na úloze výstavby nového ZEVO**

Rozhodnutí  $x$  v prvním stupni definuje kapacitu ZEVO, maximální výkon kotle či turbíny a její typ. Rozhodnutí  $y(\xi)$  ve druhé stupni už definuje podrobnější charakteristiky jako je například aktuální výkon kotle, způsob provozování turbogenerátoru apod.

Pokud je přistupováno k úloze formou HN, bude výsledkem jediné řešení, které z hlediska zadaných vstupních proměnných splňuje podmínky optima. Zde je ovšem potřeba položit si několik důležitých otázek. Která proměnná měla největší vliv, že právě toto řešení je optimální? Jednalo se o vliv kombinace proměnných? Změní se výsledek, pokud dojde k malé změně vstupních parametrů? a pokud ano, tak které to jsou a jaká je šance, že se do budoucna opravdu budou měnit. Je zřejmé, že u dlouhodobých projektů, které mají fungovat značné časové období do budoucna nemusí být přístup HN dostatečně uspokojující, protože vstupní parametry je v rámci delšího časového horizontu velice těžké odhadnout, což platí i pro scénáře budoucího vývoje. Důležité je tedy znát odpověď na výše zmíněné otázky a až na základě nich se rozhodnout, zda je výsledek opravdu vhodný. Protože HN funguje jako „černá skříňka“, do které není příliš vidět, je v některých případech vhodnější přejít k metodě WS, která podá odpovědi na otázky, co se stane v případech, kdy se změní některé proměnné.

Metoda WS dokáže poskytnout výsledek pro jednotlivé scénáře, ale vzhledem k jejich počtu je velice obtížné výsledky pro každý scénář zpracovat. V současné době už software NERUDA dospěl do fáze, kde neoptimalizuje jen ekonomickou situaci, ale věnuje se i environmentálním aspektům, jak je publikováno v (Nevrlý, 2019). Výsledek jediné kombinace nastavení vstupních parametrů (jeden scénář) dává vždy relativně přehledný náhled na situaci, která v něm nastala, jak je vidět na následujícím obr. 23.



**Obr. 23** Zobrazení vhodných lokalit a pohybu komodit pro zvolený scénář (Šomplák, 2019)

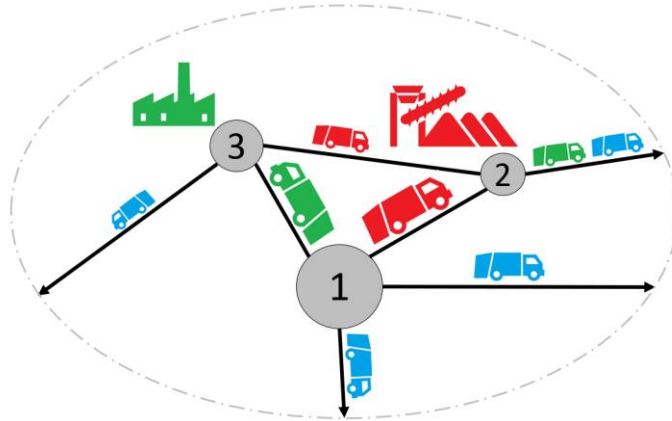
Problém je, že těchto výsledků, v tomto případě map, je stejné množství jako výpočetních scénářů. Počet těchto scénářů se odvíjí od počtu proměnných a predikce jejich změny v závislosti na vývoji aktuálního dění a expertních analýz. V uvažovaném případě této práce je počet scénářů roven 500. Každý výsledek se může v některých ohledech lišit. Analýza výsledků pro 500 scénářů, která se snaží odhalit, co vedlo právě k tomuto výsledku, není zrovna nejvhodnější způsob. Odhalit, co vedlo k danému výsledku nemusí být elementární úloha a opakovat ji pro větší množství scénářů může vést k nepřijatelné časové náročnosti. Zdaleka ne všechny výsledky se od sebe odlišují nějak výrazně a pro danou osobu (potenciálního investora nových zařízení, starostu obce apod.) nemusí být tento rozdíl podstatný, jelikož se jejich oblasti zájmu vůbec netýká. To celé vede k myšlence, že by se podle oblasti zájmu daly výsledky rozřadit do několika skupin. Členové každé skupiny by si z jistého hlediska/hledisek byli výrazně podobní. Zároveň by se, ale odlišovaly od členů v ostatních skupinách. Tento přístup je vysvětlen na následujícím příkladu. Pro lepší pochopení je využit obr. 24.

*Př.: Starosta obce 1 a potencionální investor ZEO, který plánuje výstavbu v obci 3, mají k dispozici 500 možných výsledků vypočtených nástrojem NERUDA. Reálně došlo ve třetině výsledků k vybudování MBÚ v blízké vesnici (červená), ve druhé třetině došlo k plánované výstavbě ZEO (zelená) a ve třetí nedošlo v okolí k žádné změně (modrá).*

*V modrém případě musí obce 1, 2 i 3 vozit odpad do vzdálenějších lokalit (modré popelářské vozy). V červeném případě pro jednoduchost vozí odpad všichni do MBÚ (červené popelářské vozy) a v zeleném případě zpracovávají obce 1 a 3 odpad v ZEO a obce 2 vozí odpad do vzdálenější lokality (zelené popelářské vozy).*



Takto vysvětlená situace je velmi průhledná, ale často zjistit informaci o tom, čím vším se výsledky od sebe odlišují, může být dost náročné. Zvláště, pokud je modelovaná lokalita příliš velká. Starosta obce 1 se zajímá hlavně o cenu za zpracování odpadu vyprodukovaného v jeho obci. Pro tuto informaci není potřeba analyzovat extrémně velký územní celek, stačí se zaměřit na určité okolí jeho obce (čerchované ohraničení v obr. 24). Tedy si definuje výsledky pouze podle výše ceny za zpracování. Najednou se mu výsledky rozdělí na 2 skupiny, z nichž v jedné má nízkou cenu za zpracování a ve druhé vysokou. Teď už stačí vybrat jen vhodného reprezentanta z každé skupiny a mnohem snáze je schopen identifikovat, proč se cena měnila. Následně odvodí, že při nízké ceně došlo k výstavbě ZEVO v obci 3 nebo MBÚ v obci 2 a vysoká cena indikuje, že bude muset zajistit odvoz odpadu do některého ze vzdálenějších zařízení.



Obr. 24 Grafické znázornění výsledků *NERUDA*

Potencionálnímu investorovi se rozpadnou výsledky také na dvě skupiny. Toho zajímá, zda se ZEVO v obci 3 postavilo, či ne. Výsledky si tedy rozdělí podle toho, kdy kapacita ZEVO byla nulová a případ, kdy ne. Obdobným rozborem pouze 2 skupin snadno analyzuje, že v případech, kdy je kapacita ZEVO nulová (ZEVO nebylo postaveno), bylo vybudováno MBÚ ve vedlejší vesnici, a tedy ZEVO mělo tak výraznou konkurenci, že nebylo schopno ekonomicky zajistit svůj provoz.

Jak investor, tak i starosta se díky rozdělení na skupiny podle svého parametru zájmu dostali mnohem snadněji k informaci o tom, proč se jejich parametr měnil a mohou se podle toho zařídit.

Předchozí příklad byl velmi jednoduchý. V reálném případě je oblastí zájmu více parametrů a dělení na skupiny už nemusí být tak intuitivní. Tyto úvahy vedou na použití shlukové analýzy, která může s dělením na jednotlivé skupiny výrazně pomoci.

Cílem této kapitoly je poukázat na vhodnou metodiku, která by byla podkladem pro manažerské rozhodování v oblasti OH a splňovala by dva základní předpoklady.

1. Jednotlivá řešení jsou dostatečně „průhledná“ z pohledu analýzy výsledku.
2. Počet výsledných řešení se pohybuje v řádu jednotek, aby bylo snadné se v nich orientovat a dělat na jejich základech potřebné závěry.

#### 4.2.1 Modelová úloha

Pro modelovou úlohu byl vybrán případ řešený pomocí nástroje *NERUDA* v roce 2019 a jeho komplexní výsledky. Nastavení okrajových podmínek výpočtu při jeho zpracování nemusí odpovídat současnému stavu (viz níže kapacity a ceny). Z pohledu vytvářené metodiky je toto nepodstatné. Předmětem zájmu je celá ČR společně s několika oblastmi v Sasku, Bavorsku a Rakousku. Úlohu producentů odpadu zde zastávaly ORP a hlavní město Praha. ČR k letošnímu roku 2022 disponuje 205 ORP, ale celkově do výpočtu vstupovalo 209 uzlů a zpracovatelů, kde zbylé tvořily agregované rakouské, bavorské, saské obce a Praha.

Jako zpracovatelé odpadu byly ve výpočtu uvažovány všechny druhy již zmíněných zařízení. Jmenovitě se jednalo o MBÚ (113), skládky (146), ZLF (2), PREKL (209, i mimo území ČR) a ZEVO. ZEVO bylo celkem 35. Jednalo se jednak o existující zařízení, ale zahrnuty byly i potencionální projekty na výstavbu. Kapacity společně s umístěním jednotlivých zařízení shrnuje tab. 5.

**Tab. 5 Uvažovaná ZEVO vstupující do výpočtu**

Existující zařízení		Uvažované zařízení	
Lokalita	Kapacita [kt/r]	Lokalita	Kapacita [kt/r]
Praha	310	České Budějovice	200
Brno	240	Hradec Králové	200
Liberec	96	Karviná	200
Plzeň	95	Mělník	200
Linz	83,3	Most	200
Wels	105	Ústní nad Labem	200
Zwentendorf	175	Jihlava	200
Zistersdorf	51,1	Otrokovice	200
Wien	248,5	Otrokovice	40
Schwandorf	135	Cheb	40
Nurnberg	69	Jihlava	40
Bamberg	36,6	Vsetín	40
Coburg	39	Valašské Meziříčí	30
Zorbau	99	Zlín	40
Leuna	117		
Lauta	66		
Grobrastchen	60		
Ingolstadt	72		
Burgkirchen	69		

Obdobně byly definovány parametry pro ostatní zařízení. Stejně jako u ZEVO byla některá zařízení pouze uvažovaná pro výstavbu. Na základě výpočtového scénáře tedy nemusela být k výstavbě doporučena.

### Definice scénářů

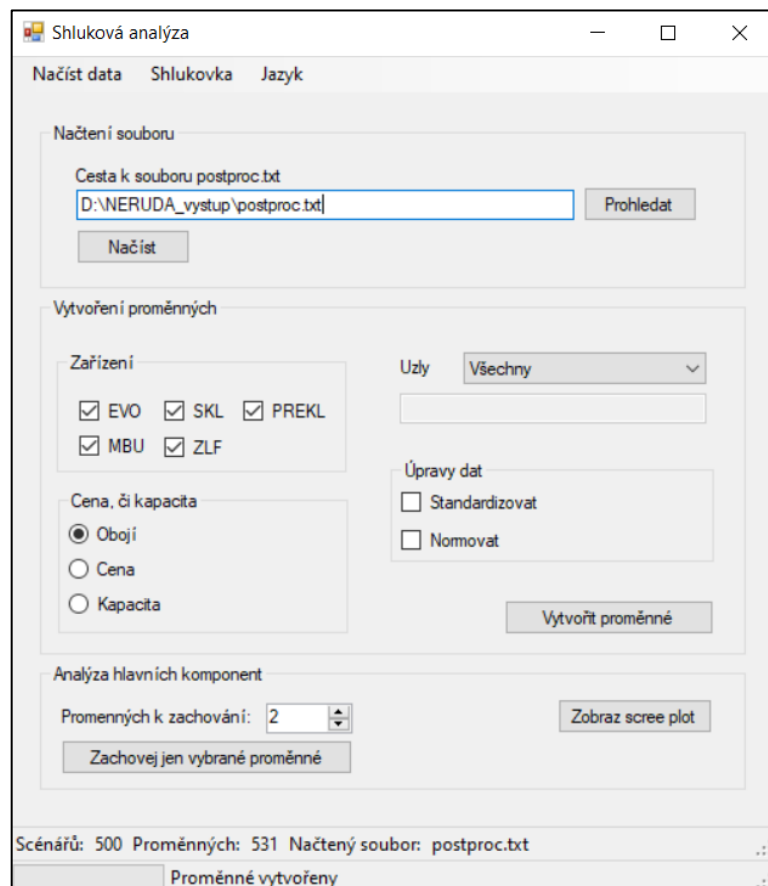
Výše bylo zmíněno, že modelová úloha se počítala opakovaně pro 500 různých kombinací vstupních hodnot parametrů (kapacita ZEVO, poplatky na bráně jednotlivých zařízení). Tyto hodnoty se generovaly na základě vhodného pravděpodobnostního rozdělení. Poplatky na bráně byly generovány na základě dat z (Šomplák, 2014).

- Kapacita ZEVO
  - Kapacita byla v každém scénáři upravena multiplikativním koeficientem, který nabýval hodnot 1,2 nebo 1,5.
  - Pro potencionální zařízení byla kapacita proměnnou, tedy vycházela z výpočtu a mohla nabývat hodnot od 0 do maximální hodnoty definované v tab. 5.
- Poplatek na bráně ZEVO [Kč/t]
  - Skládá se z fixní a variabilní části, kde variabilní část je generována z rovnoměrného rozdělení.
    - Pro existující ZEVO byla fixní část nulová a skládal se pouze z variabilní části.
      - Pro bavorské a rakouské ZEVO z intervalu <1620,2700>.

- Pro saské ZEVO z intervalu <1350,2160>.
- Pro české ZEVO z intervalu <1000,1500>.
- Pro potenciální ZEVO byla fixní část definována náklady na výstavbu dle doporučené kapacity a variabilní definována zvlášť pro každé zařízení rovnoměrným rozdělením.
- Poplatek na bráně MBÚ [Kč/t]
  - Skládá se z fixní a variabilní části, kde variabilní část je generována z rovnoměrného rozdělení.
    - Potenciální MBÚ měly fixní část definovanou náklady na výstavbu dle doporučené kapacity a variabilní z intervalu <-75,75>.
- Poplatek na bráně PREKL [Kč/t]
  - Pro veškerá PREKL stejně jako pro potencionální ZEVO.
  - Variabilní část byla generována z intervalu <-5,5> pro všechna PREKL.
- Skládkovací poplatek [Kč/t]
  - Zafixován na hodnotě 2 500 Kč/t, tedy cena na bráně SKL je rovna 3 200 Kč/t.
- Poplatek na bráně ZLF [Kč/t]
  - Pro potenciální ZLF obdobně jako pro potencionální ZEVO.
  - Pro zahraniční stanovena pevná hodnota 950.

### Výsledky výpočtového nástroje NERUDA

Pro zpracování výsledků byl využit nástroj CAO (Onderlička, 2016) pro shlukovou analýzu. Software byl postupně přizpůsoben přesně na formát, ve kterém je možné zpracovat výsledky z nástroje NERUDA. Ukázka uživatelského rozhraní CAO je na obr. 25.



Obr. 25 Uživatelské prostředí nástroje CAO

Celkové výsledky všech proměnných vystupují ze softwaru NERUDA ve formě textového dokumentu „postproc.txt“. Pro shlukování je možnost si vybrat pouze některé proměnné, podle kterých se má shlukovat. Může se jednat o typy zařízení. Pokud například není oblastí zájmu cena ani kapacita PREKL, pak lze jednoduše přes zaškrtačací pole PREKL z výpočtu odstranit. Další možnou změnou je brát v úvahu pouze část uvažovaného územního celku, a to definicí pouze některých uzlů.

Nástroj je připraven též na normování či standardizaci dat. V tomto případě se pod pojmem normování skrývá úprava proměnných dle vzorce

$$y_{i,j} = \frac{x_{i,j} - \min_j x_{i,j}}{\max_j x_{i,j} - \min_j x_{i,j}}, \quad (7)$$

kde  $i$  je index scénářů,  $j$  je index proměnných,  $y_{i,j}$  je normovaná proměnná,  $x_{i,j}$  jsou původní proměnné. V tomto případě je proměnná kapacita nebo cena na bráně určitého zpracovatelského zařízení. Rozsah nových proměnných se tak pohybuje v rozmezí od 0 do 1. Za použití stejného značení lze definovat i standardizace

$$y_{i,j} = \frac{x_{i,j} - \bar{x}_j}{s_j}, \quad (8)$$

Kde  $\bar{x}_j$  je průměr a  $s_j$  je směrodatná odchylka  $j$ -té proměnné. Výsledkem jsou v tomto případě data, která mají nulový průměr a směrodatnou odchylku rovnu jedné. Cca 99,8 % dat by tedy mělo procházet z intervalu od -3 do 3. V případě, že nepochází data z normálního rozdělení, může dojít spíše ke ztrátě informace než ke zlepšení. Pokud se bude jednat o kapacitu zařízení, která byla v 50 případech využita a 450 nevyužita, tedy rovna nule, pak stěží půjde o normální rozdělení. Pro účely zpracování těchto dat je proto nevhodná.

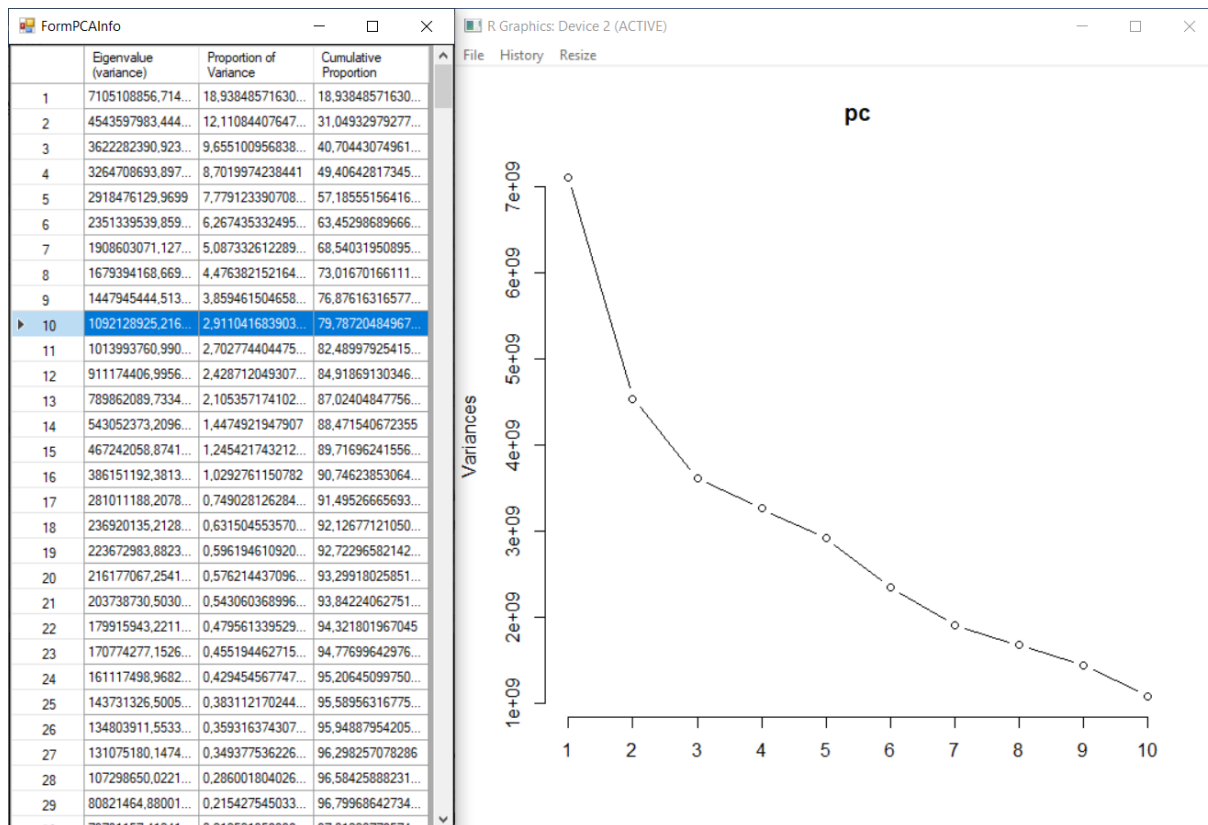
Normalizace už může být vhodným pomocníkem. Kapacity a ceny na bráně zařízení nemusí být z hlediska velikosti porovnatelné, tedy pokud nedojde k normalizaci dat, může se stát, že jedna z těchto proměnných bude v analýze dominovat a potlačí vliv té druhé. Typický příklad může nastat, pokud by výsledná cena na bráně byla uváděna v tis. Kč místo Kč, pak by se bez normování výrazně snížil její vliv na tvorbu shluků. V současné podobě, kdy je kapacita uváděna v tunách za rok a cena v Kč za tunu komodity, bude mít výraznější vliv právě kapacita velkých zařízení, což nemusí být vyloženě špatný předpoklad, pokud má být analýza zaměřena právě na kapacitu zařízení. Nedošlo by tak k úplné eliminaci vlivu cen na bráně jako kdyby se tyto proměnné z analýzy přímo odebraly, ale zároveň by zůstal důraz na kapacitu zařízení.

V obou případech, jak při normování, tak standardizaci, je nutné pečlivě zvážit, jaký bude mít tato transformace dopad na výpovědní hodnotu dat a dle toho ji využít. Následující příklad pracuje se surovými daty bez výše zmíněných úprav.

Po korektním zadání výsledků z nástroje NERUDA a specifikaci proměnných, podle kterých se shlukuje, se zadá „Vytvořit proměnné“ (stejnoujmenným tlačítkem). Pro následující příklad byly ponechány všechny typy zařízení v celé ČR (společně s několika obcemi v zahraničí). Počet proměnných je vzhledem k typům zařízení a jejich hustému rozložení značný. V tomto případě se jedná o 531 proměnných.

Vysoký počet proměnných ztěžuje jejich interpretaci, proto je vhodné využít metodu hlavních komponent (PCA – Principal Component Analysis). Tato metoda vytváří nové proměnné (komponenty),

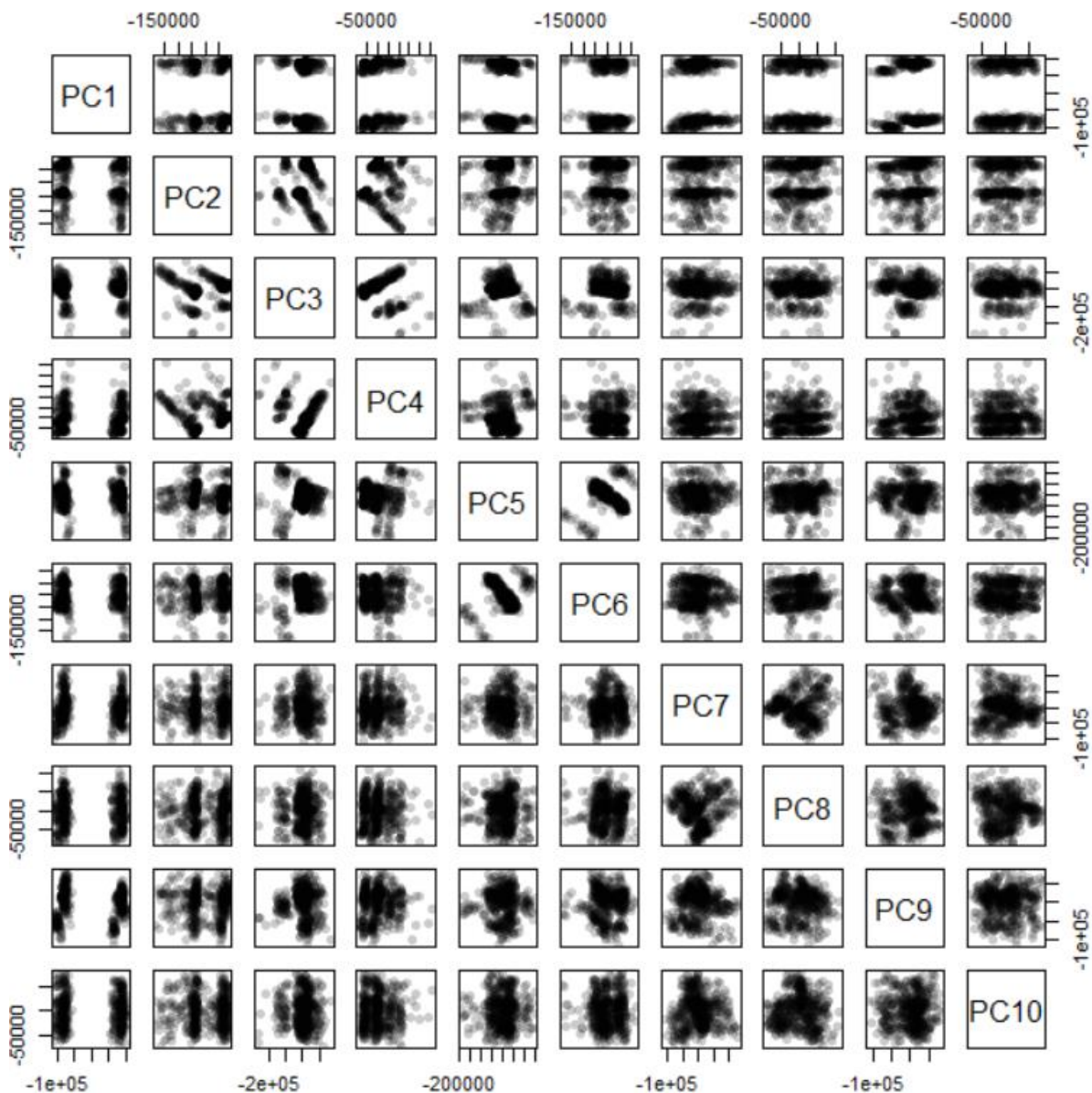
kteří jsou lineární kombinací původních proměnných, jsou vzájemně nezávislé, jejich počet je nižší, ale zároveň popisují variabilitu výsledků s minimem ztráty informace. PCA je zabudována v softwaru CAO, kde tlačítkem „Zobrazit scree plot“ jsou v tabulce zobrazeny jednotlivé komponenty, včetně informace, kolik daná komponenta popisuje původní variability a zároveň je vykreslen indexový graf (scree plot), viz obr. 26. Podle těchto dvou indikátorů se určuje vhodný počet komponent.



Obr. 26 Tabulka komponent z PCA (vlevo) a scree graf (vpravo)

Indexový graf z obr. 26 zobrazuje závislost jednotlivých komponent na vysvětlované variabilitě. Při odvození počtu proměnných dle grafu se postupuje dle jeho směrnice. Čím více se směrnice blíží nule, tím méně informace (popisované variability) další komponenta přináší. Hledá se tedy bod grafu, kde se náhle zvýší hodnota směrnice, oproti předchozí lineární části. V zobrazeném případě je těžké tento zlom jednoznačně určit, tak je vhodné postupovat pomocí tabulky, kde se najde řádek s požadovanou hodnotou popisované variability a z něj se odečte počet komponent. Samozřejmě, že čím vyšší hodnota je požadována, tím hodnotnější jsou výsledky, zároveň však jde o redukci proměnných, takže je nutné mezi těmito kritérii udělat vyhovující kompromis. Publikace (Hair, 2010) uvádí, že minimum popisované variability musí být alespoň 60 %, což na obr. 26 odpovídá 6 komponentám. Je to ale doporučení minima, volba tedy závisí čistě na požadovaném výsledku. Z hlediska menší ztráty informace je pro další analýzu ponecháno 10 komponent. Samozřejmě by se dalo uvažovat i o vyšším počtu komponent, ale z výpočetních důvodů byl limit komponent v softwaru CAO omezen právě na hodnotu 10. V případě, že počet komponent nevysvětluje dostatečnou variabilitu dat, je potřeba zvážit, zda je procento vysvětlované variability 10 komponentami dostatečné (v tomto případě necelých 80 %), případně omezit počet původních proměnných.

Tlačítko „Zachovej vybrané proměnné“ určí počet komponent, které se zachovají pro shlukovou analýzu. Grafy se závislostí vybraných komponent (označeny PC1-10) jsou zobrazeny na obr. 27.

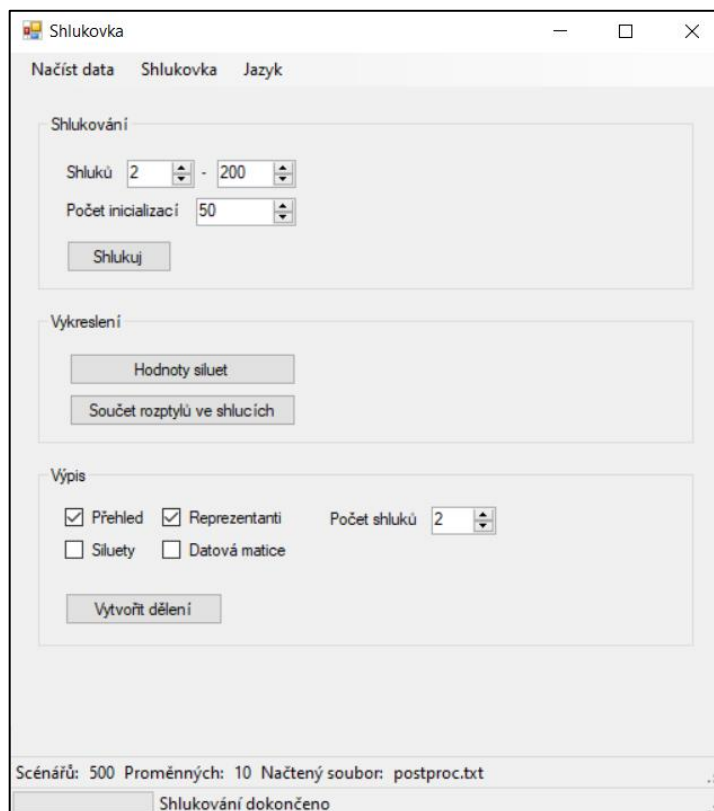


**Obr. 27** *Vzájemná závislost komponent faktorové analýzy*

Je vidět, že dle některých komponent se výsledky dají dělit na několik shluků. Například komponenta PC1 rozděluje výsledky na 2 jasné shluky. V ostatních grafech už příliš zřetelné dělení na skupiny rozpoznat nelze, což znamená, že výsledná shluková analýza pro zvolený soubor dat nemusí poskytovat dobré výsledky.

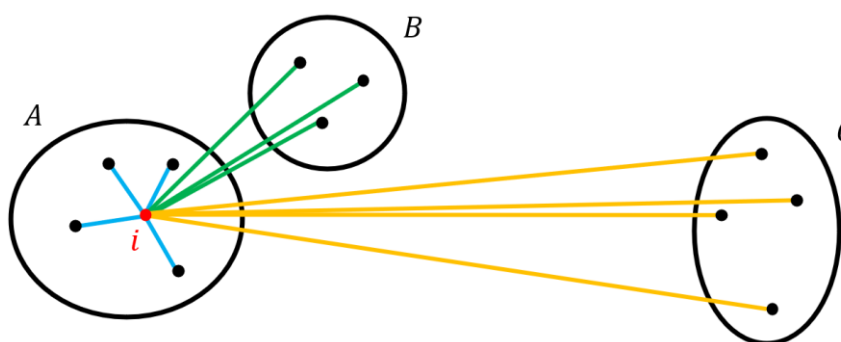
Shluková analýza je provedena pomocí metody k-means. Jedná se o nehierarchickou metodu shlukování, která požaduje předem zvolený počet shluků. Z celého datového souboru se zvolí těžiště shluků. Následně se do jednotlivých shluků přiřadí všechny prvky, dle předem stanoveného kritéria. Kritérium stanovuje tzv. vzdálenost mezi shluky. Prvek je přiřazen do shluku, k jehož těžišti má neblíže. Následně jsou přepočítány těžiště shluků a proces se opakuje. Jedná se tedy o iterační metodu, která konverguje v konečném množství kroků. Výsledek však závisí na počáteční volbě těžišť shluků, proto je vhodné opakovat výpočet pro více inicializací. K následnému ověření kvality výsledných shluků se používá kritérium siluet.

Modul k-means je přímo součástí nástroje CAO. Umožňuje volit počet shluků, ale i inicializací, které jsou k těmto shlukům využity, viz obr. 28.



**Obr. 28 Modul k-means nástroje CAO**

Hodnocení kvality shluků je zde provedeno pomocí siluet, kde silueta popisuje „kvalitu“ přiřazení jednotlivého člena shluku k danému shluku. Podrobná konstrukce siluet vyžaduje definici několika dalších parametrů. Pro lepší pochopení, je zde „odlišnost“ jednotlivých členů shluku definována euklidovskou metrikou. To znamená, že se jedná o klasicky vnímanou vzdálenost, která by mohla být změřena obyčejným pravítkem. Pro další ilustraci je využit obr. 29.



**Obr. 29 Pomocná ilustrace pro výpočet siluet (Rousseeuw, 1986)**

Příklad je popsán pro člen (bod)  $i$  z obr. 29, který je přiřazen do shluku (množina bodů)  $A$ . Průměrná vzdálenost tohoto členu od všech ostatních je definována vztahem (9).

$$a(i) = \frac{\sum_{j \in A - \{i\}} \rho(i, j)}{|A| - 1}, \quad (9)$$

kde  $\rho(i, j)$  představuje euklidovskou vzdálenost,  $|A|$  je mohutnost množiny  $A$ .  $a(i)$  je tedy součtem délek všech modrých úseček z obr. 29. Dále je potřeba definovat průměrnou vzdálenost členu  $i$  od jiného shluku, viz (10).

$$d(i, X) = \frac{\sum_{j \in C} \rho(i, j)}{|X|}, \quad (10)$$

kde  $X$  je libovolná množina mimo  $A$ . Vztah (10) se spočítá pro všechny množiny  $X \neq A$  a vybere se z něj minimum  $b(i)$ , tedy

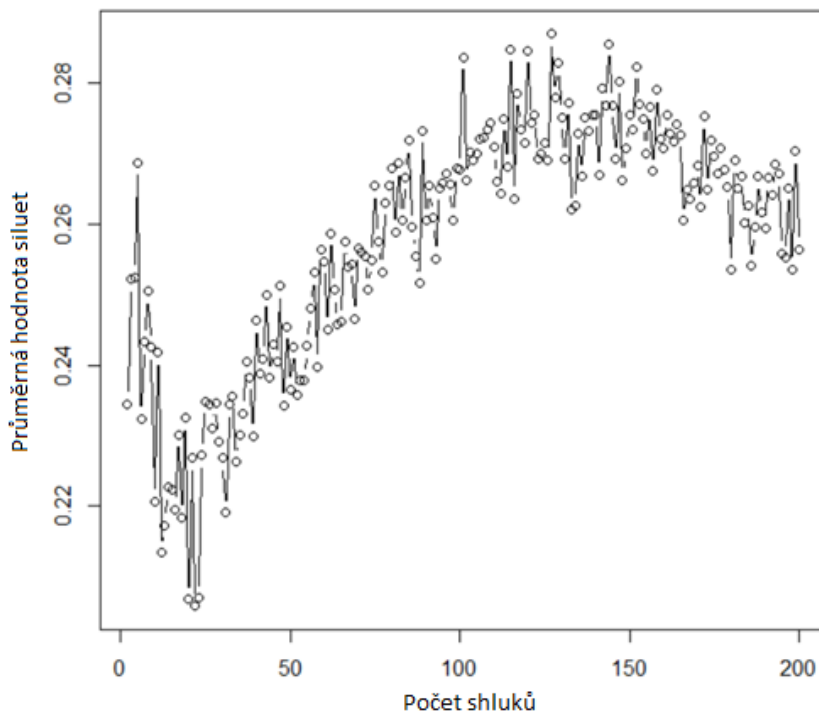
$$b(i) = \min_{X \neq A} d(i, X). \quad (11)$$

V tomto případě platí  $b(i) = d(i, B)$ , což je součet vzdáleností všech zelených úseček. Za pomoci předchozích vztahů, lze již přesně definovat hodnota siluety bodu  $i$  jako

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}}. \quad (12)$$

V případě, že  $i$  je jediným bodem v množině  $A$ , pak  $a(i) = 0$ . Společně s touto informací lze jednoznačně určit, že siluety nabývají hodnoty z intervalu  $(-1; 1)$ , kde hodnoty blízké hodnotě 1 značí, že daný člen je dobře zařazen, a naopak špatně zařazen pro hodnoty blízké minus 1. Popis siluet byl vypracován na základě (Rousseeuw, 1986).

Modul k-means CAO umí průměrné hodnoty shluků vykreslit, pro jednotlivé počty shluků (tlačítko „Hodnoty siluet“), aby měl uživatel jednodušší rozhodování, který počet zvolit, viz obr. 30.



**Obr. 30 Průměrná hodnota siluet pro dané počty shluků**

Celkově vstupovalo do shlukové analýzy 500 scénářů. Počet shluků byl zvolen od 2 do 200. Je vidět, že průměrná hodnota siluet je maximálně kolem 0,25, což svědčí o tom, že zvolená data nelze vhodně rozdělit do několika skupin tak, aby se dal daný shluk charakterizovat nějakými společnými rysy.



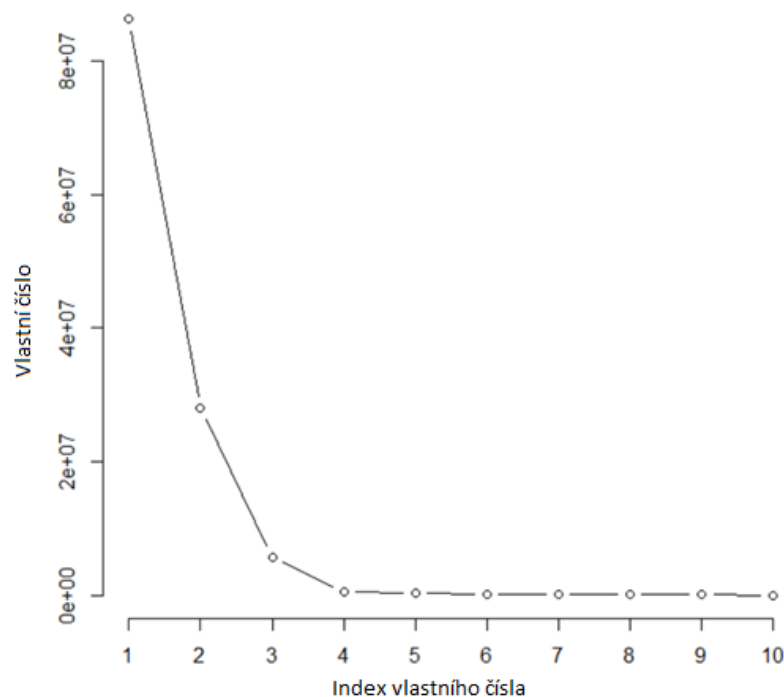
Poslední důležité tlačítko je „Vytvořit dělení“, které zkonstruuje excelovský soubor obsahující přehled o počtu scénářů, jejich rozdělení do shluků s definovaným reprezentantem, a také hodnoty siluet pro jednotlivé prvky shluku (scénáře).

Na tomto příkladu bylo jednak ukázáno, jak se pracuje s výpočtovým nástrojem CAO a zároveň, že v některých případech nelze shluková analýza rozumně využít, a tedy rozdělit výsledky nástroje NERUDA do několika skupin. Minimálně to nelze pro tyto výsledky, ve kterých se uvažují veškeré proměnné (cena i kapacita všech typů zpracovatelských zařízení ve všech krajích). Dále je ukázáno, že shluková analýza má za určitých podmínek využití, musí se ovšem omezit počet proměnných.

### Karlovarský kraj

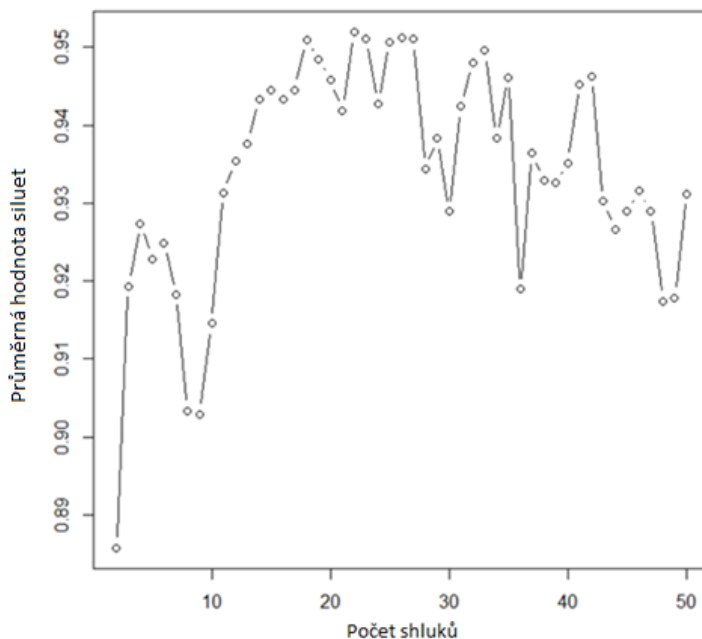
Pro další postup byla provedena eliminace množství proměnných. Dále se tedy neuvažuje celá ČR, ale pouze Karlovarský kraj. Byl vybrán proto, jelikož se jedná o kraj, ve kterém není ZEVO, ale v modelu je uvažována možná výstavba v obci Cheb. Jde sice o výrazné zjednodušení, ale z pohledu praxe to dává smysl, jelikož analýza jednotlivých krajů ČR může být hodnotným zdrojem pro jednotlivé hejtmany, případně pro firmy operující v OH pouze na menším území.

Vzhledem k tomu, že počet proměnných je snížen zmenšením uvažovaného území, tak ve shlukované analýze byla ponechána cena na bráně zařízení i kapacita. V případě Karlovarského kraje je na indexovém grafu (viz obr. 31) názorně vidět, že směrnice grafu se výrazně mění ve čtvrtém bodě, tedy ideální je ponechat pouze 4 komponenty, které popisují přes 99 % variability dat.



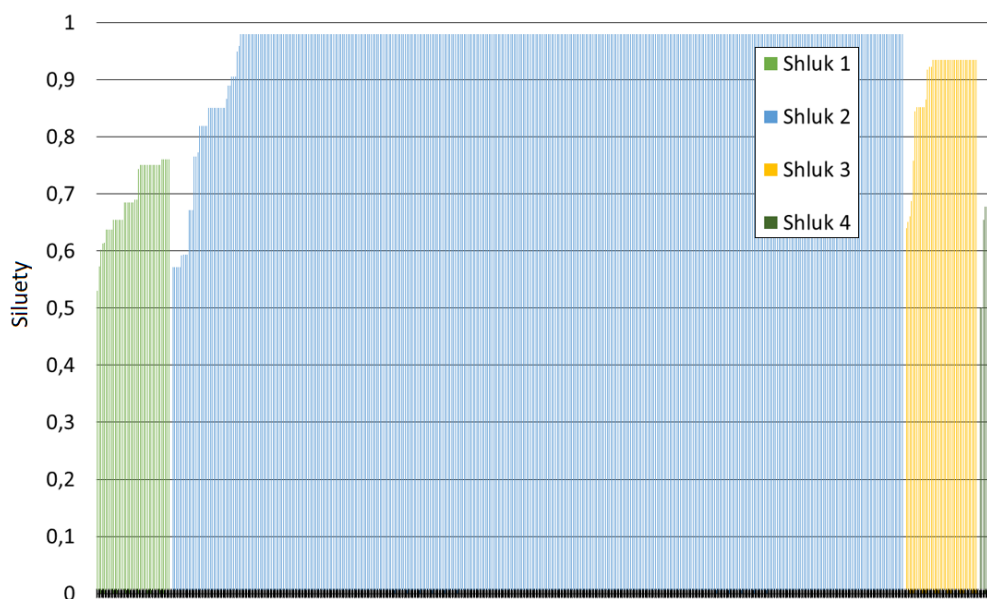
**Obr. 31 Indexový graf Karlovarského kraje**

Dále byla opět použita metoda shlukování k-means a byly vyčísleny hodnoty průměrných siluet pro jednotlivé shluky, viz obr. 32. Maximální hodnota vychází při počtu 22 shluků, ale už při pouhých 4 shlucích je průměrná hodnota siluet téměř 0,93. Vzhledem ke snaze minimalizovat počet shluků, ale zároveň mít co nejvyšší hodnotu siluet byly dle expertního odhadu zvoleny 4 shluky.



**Obr. 32 Průměrné hodnoty siluet – Karlovarský kraj**

Přesné hodnoty siluet pro každý výsledek softwaru NERUDA (scénář) je zobrazen na obr. 33. Scénáře jsou rozděleny do čtyř shluků. Každý shluk má jinou mohutnost a je zastoupen jedním reprezentantem.



**Obr. 33 Siluety jednotlivých scénářů**

U shluku číslo 2 a 3 je patrné, že mnoho scénářů má stejnou hodnotu siluety, což poukazuje na fakt, že odlišnost scénářů od reprezentanta shluku je stejná. Komponenty, které byly použity pro výpočet shluku, popisovaly 99 % variability původních dat, takže lze říci, že tyto scénáře se shodují s největší pravděpodobností z 99 %, ale je zde velká šance, že jsou plně totožné. Množství prvků ve shluku je popsáno v tab. 6.

**Tab. 6 Počet prvků ve shlucích**

Shluk	1	2	3	4
Počet prvků (scénářů)	41	409	40	10
Procentuální zastoupení prvků [%]	8,2	81,8	8	2

Toto zjištění je samo o sobě velice důležité. Jak již bylo zmíněno, tak na výsledky softwaru NERUDA navazuje například nástroj PIGEON a v případě, že některé výsledky jsou pro danou oblast zájmu totožné je třeba je identifikovat a duplicitu odstranit. Výpočet PIGEON tak nemusí proběhnout pro každý výsledek, ale pouze pro ty, které jsou odlišné. Zde je však potřeba pamatovat na fakt, že výsledek se několikrát opakoval, a proto je potřeba mu přisuzovat větší váhu.

Společný prvek výsledků je také důležitou informací, která může případným investorům pomoci při rozhodování. Například v tomto případě shluk 4 popisuje výsledky, kde byla provedena výstavba ZEVO v obci Cheb. Jedná se pouze o 2 % z celkového počtu scénářů, což reálné výstavbě příliš nenahrává.

Aplikace softwaru PIGEON by zde pro všech 500 scénářů postrádala smysl. Shluková analýza ukázala, že lze vybrat pouze několik málo reprezentantů, na které lze PIGEON aplikovat a výrazně tak zkrátit výpočetní čas. Vzhledem k podobnosti jednotlivých výsledků je předpoklad, že výsledky nástroje PIGEON pro reprezentanta budou také podobné pro celý shluk. Konkrétní ověření už je nad rámec této práce a nechává prostor pro budoucí výzkum v této oblasti.

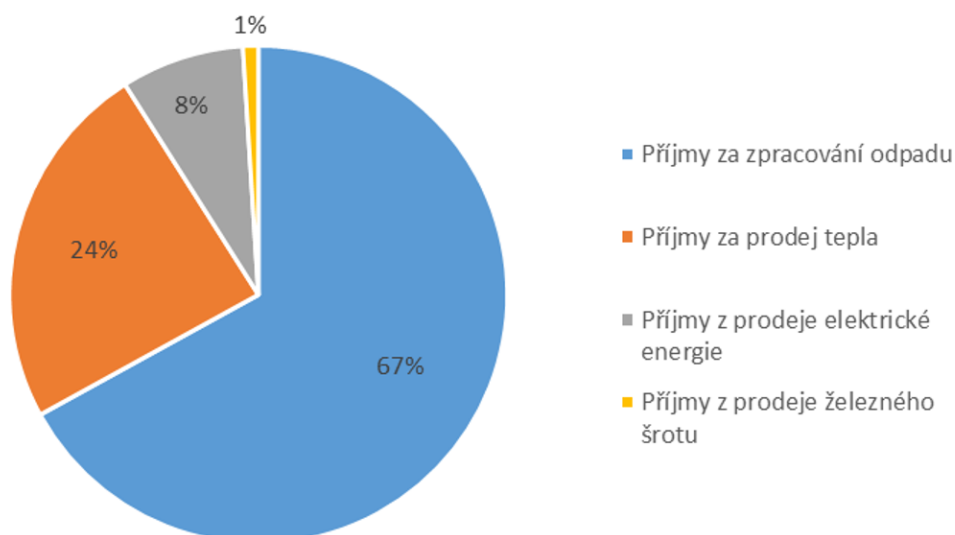
V tab. 7 jsou připojeny veškeré závislosti průměrných siluet pro dané počty shluků pro všechny kraje. Je očividné, že výsledky některých krajů nejsou pro tuto analýzu vhodné, avšak pro některé kraje může tento přístup zajistit značné zjednodušení. Navíc díky představenému nástroji je pro tyto úlohy provedení shlukové analýzy velmi jednoduché a časově nenáročné, proto je vhodné ji učinit.

**Tab. 7 Doporučený počet shluků pro jednotlivé kraje**

Kraj	Počet shluků	Průměrná hodnota siluet
Praha	5	1
Jihočeský	2	0,84
Jihomoravský	2	0,94
Karlovarský	4	0,93
Královéhradecký	4	0,63
Liberecký	4	0,76
Moravskoslezský	3	0,90
Olomoucký	2	0,78
Pardubický	7	0,83
Plzeňský	11	0,70
Středočeský	16	0,54
Ústecký	2	0,93
Vysočina	4	0,92
Zlínský	9	0,69

## 5 ZEVO INTEGROVANÉ V RÁMCI TEPLÁRENSKÉHO ZDROJE: OPTIMALIZACE KONCEPČNÍHO NÁVRHU

Druhá skupina úloh, kterou se tato práce zabývá, se soustředí na koncepční návrh ZEVO a jeho integraci do systému s dalším teplárenským zdrojem. Při výběru vhodné lokality pro výstavbu nového ZEVO je třeba brát v úvahu dva základní parametry: dostupnost odpadu a odbyt tepla. Odpad se generuje ve veškerých obydlených oblastech a otázkou je pouze jeho množství. Problém může představovat omezený odbyt tepla, viz obr. 34.



**Obr. 34 Příklad rozložení příjmů za jednotlivé komodity (Putna, 2018)**

Na obr. 34 je příklad koláčového grafu příjmů ZEVO o kapacitě 130 kt a uvažované poptávce po teple 600 TJ/r. Jak je vidět, tak příjmy z prodeje tepla činí 24 % a u menších kapacit může toto číslo ještě narůstat. Nejedná se tedy o zanedbatelnou položku a zajištěný odbyt tepla je z hlediska ekonomiky velkou výhodou. V ČR jsou v podstatě dvě základní možnosti odbytu tepla. Je to napojení na CZT nebo k průmyslovým objektům.

Tam, kde se nacházejí tepelné sítě s odběrem tepla, už musí existovat tepelné zařízení, které poptávku po teple naplňuje. Úloha se tedy rozšiřuje na modelování existujícího tepelného zařízení a zároveň jeho kooperaci s nově uvažovaným ZEVO, tzv. integrovaný systém ZEVO s teplárnou. Jelikož velikost sítě (poptávka po teple) je známa a taktéž cena tepla, která je v ČR uvažována konstantní po celý rok, vede to ke snížení počtu proměnných. Různá cena tepla pro každý měsíc je uvažována například v (Wahlroos, 2017), kde se autoři zaměřují na problematiku centrálního vytápění v Norských zemích. Je možné, že do budoucna bude nabývat cena tepla v ČR různých hodnot pro každé roční období nebo bude dokonce záviset na poptávaném množství, ale v dosavadní praxi a zde představeném výzkumu je zatím uvažována jako konstanta.

### 5.1 Finanční hodnocení projektu

Klíčovým parametrem ke zhodnocení investice projektu je zvolení vhodné charakteristiky, která ho výstižně popisuje. Mezi nejčastěji používané se řadí doba návratnosti (PP – Payback Period), čistá současná hodnota (NPV – Net Present Value) a vnitřní výnosové procento (IRR – Internal Rate of Return). Příklad užití IRR a NPV je uveden v (Zhao, 2016). Všechny tyto hodnoty operují s velikostí počáteční investice a s peněžními toky v jednotlivých letech. Nejjednodušší výpočet poskytuje právě

PP, ale to nepracuje s časovou hodnotou peněz, a navíc nepočítá s peněžními toky, které následují po splacení investice. Proto je v této práci zmíněn až přístup NPV, který přináší komplexnější náhled na zhodnocení investice, viz vztah (13)

$$NPV = \sum_{r=0}^N \frac{CF_r}{(1-m)^{r'}} \quad (13)$$

kde  $CF_r$  je peněžní tok v roce  $r$ ,  $N$  je délka životnosti projektu a  $m$  je diskontní úroková míra. Investice je započítána do peněžního toku v roce  $r = 0$ . Komplikace u tohoto přístupu nastává při porovnávání více projektů mezi sebou. Pokud projekt A bude v řádech milionů a projekt B pouze v řádech stovek tisíc, pak při stejné kladné hodnotě NPV je pochopitelně výhodnější investovat do projektu B, jelikož s nižší počáteční hodnotou dosáhl stejného zisku. Obecně porovnávat výši NPV tedy nemusí být v případě investičně rozdílných projektů jednoduché. Z tohoto důvodu se v této práci bude používat pro zhodnocení investic IRR.

$$I = \sum_{r=1}^N \frac{CF_r}{(1-IRR)^{r'}} \quad (14)$$

kde  $I$  je počáteční investice vložená do projektu. Faktor IRR je nejčastěji používaný, jelikož oproti PP bere v úvahu časovou hodnotu peněz i peněžní toky po splacení investice a oproti NPV nevyžaduje znalost diskontní úrokové míry. Podrobnější informace o rozdílu IRR a NPV jsou definovány v (Weber, 2014).

Jistá úskalí v použití IRR tu však jsou. Jedná se především o výpočetní problémy. Zmíněný vzorec lze použít pouze v případě, že všechny toky  $CF_r$  nabývají kladné hodnoty. V případě porušení této podmínky nemusí být IRR jednoznačně určeno. Zde se zavádí předpoklad, že tato situace při simulaci ekonomiky ZEVO nikdy nenastane. Tedy zásadní rekonstrukce, díky kterým by byla podmínka porušena (např. výměna čištění spalin v důsledku zpřísnění emisních limitů), budou financovány z tzv. fondů budoucího rozvoje. To znamená, že velké náklady, které by způsobily propad příjmů do záporných hodnot, budou rozpočítány do několika let, aby k propadu nedošlo.

Pro výpočet se převážně využívají iterační metody, které pracují se vzorcem pro NPV. Pro účely této práce, jak už se v předchozích pracích autora ukázalo (Janošák, 2016a, b), se po dobrém zvolení omezujících podmínek dá výpočet řešit pomocí nelineární optimalizace v softwaru GAMS.

## 5.2 Hodnocení rizik potenciálního projektu

Veškeré výpočty ohledně finančních kritérií jsou samozřejmě zatíženy chybou. Nejedná se však o numerickou chybu výpočtu, ale spíše o nepřesnosti v peněžních tocích a investicích. Veškeré výpočty jsou postaveny pouze na předpokladech vývoje budoucí situace. Odhad budoucího vývoje na takovou dobu, jako je životnost celého zařízení, je téměř nemožný, proto se při modelování přistupuje k tzv. stochastickému programování, kde stochastickou proměnnou jsou právě nejistoty v podobě poptávky po teple, ceny energií atd. Podrobně se problematikou stochastického programování zabývá (Kall, 1994).

V případě optimalizace provozu ZEVO charakterizuje účelová funkce převrácenou hodnotu rozdílu výdajů a nákladů. Tedy úloha maximalizuje zisk. Neznámé jsou kapacita zařízení, typ kotle, počet turbín a jejich hltnost, ale také množství páry vyrobené v kotli a jeho rozvod na turbíny či ke spotřebiteli, případně množství odpadu dávkované na spalovací rošt. Stochastická proměnná (vektor) v podobě náhodné veličiny  $\xi$  představuje poptávku po teple, cenu za elektrickou energii, množství svezého odpadu apod. Jedná se tedy o úlohu stochastického programování, která se řeší zpravidla metodou HN

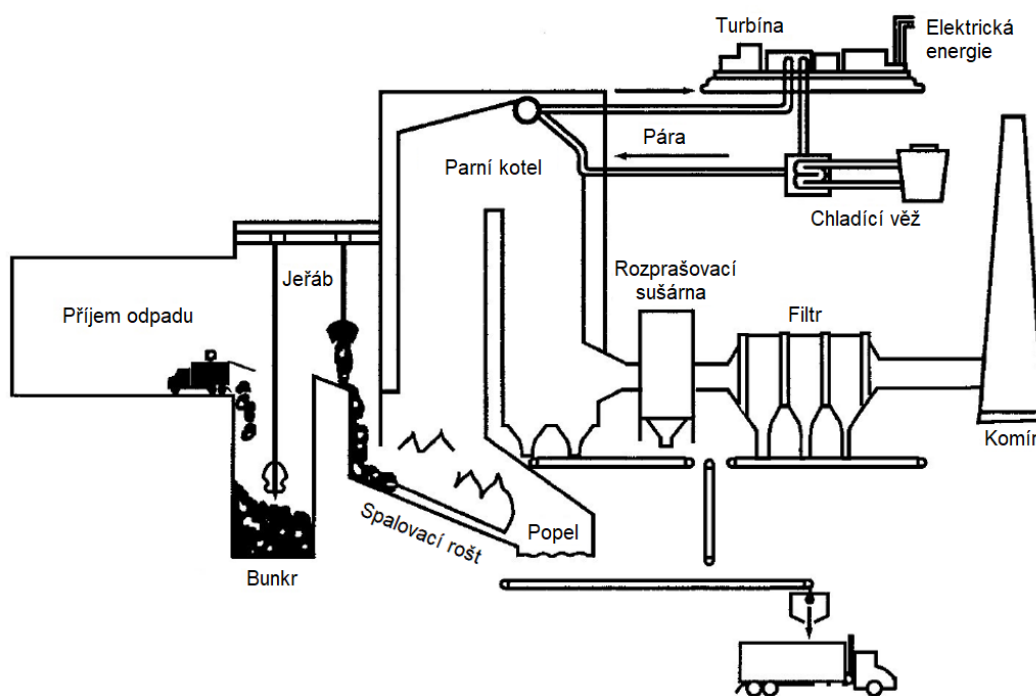
nebo WS, které byly lehce představeny v kapitole 4.2. Z této kapitoly také vyplývá, že je vhodné se uchýlit spíše ke scénářovému přístupu WS.

Komplikace zmíněného přístupu nastávají při definování možných scénářů. Po důkladné analýze současné situace a budoucího vývoje je možnost určit o jaké scénáře se bude jednat, ale krizovým místem je stanovení pravděpodobnosti, s níž nastanou. Otvírají se sice možnosti v podobě ekvidistantního nastavení pravděpodobnosti, ale po interpretaci na danou problematiku se jeví značně nevhodné. Podrobněji jsou scénáře rozebrány v kapitole 5.6.

### 5.3 Model ZEVO

V předchozím textu byla popsána problematika zhodnocení projektu výstavby ZEVO. Zde je kladen důraz na sestavení modelu, jehož úkolem je stanovení dat potřebných pro výpočet IRR a také stanovení vhodných scénářů. Veškerá uveřejněná data byla získána na základě výzkumného projektu č. TE02000236 "Waste-to-Energy (WtE) Competence Centre", na jehož řešení se autor podílel.

V první řadě je potřeba představit schéma zařízení, podle kterého se celý model bude konstruovat. Zjednodušené schéma ZEVO je znázorněno na obr. 35.



**Obr. 35 Zjednodušené schéma ZEVO (Waste-to-Energy Resource Recovery, 2010)**

Základem celého modelu je kapacita  $G$  zvoleného zařízení neboli množství odpadu, které je schopno s instalovanou technologií zpracovat za rok. Běžně se uvádí v kt za rok. Ve světě se můžeme setkat s rozmezím kapacit v řádu jednotek kt za rok až po stovky. Pro účely této práce bude stanoveno rozmezí pro kapacitu od 10–300 kt. Toto omezení pramení hlavně z podmínek ČR, na kterou je tato práce směřována. Větší kapacity by v ČR mohly mít problém s uplatněním vyrobeného tepla a získáváním dostatečného množství odpadu, který by pravděpodobně musel být svážen z velkých vzdáleností.

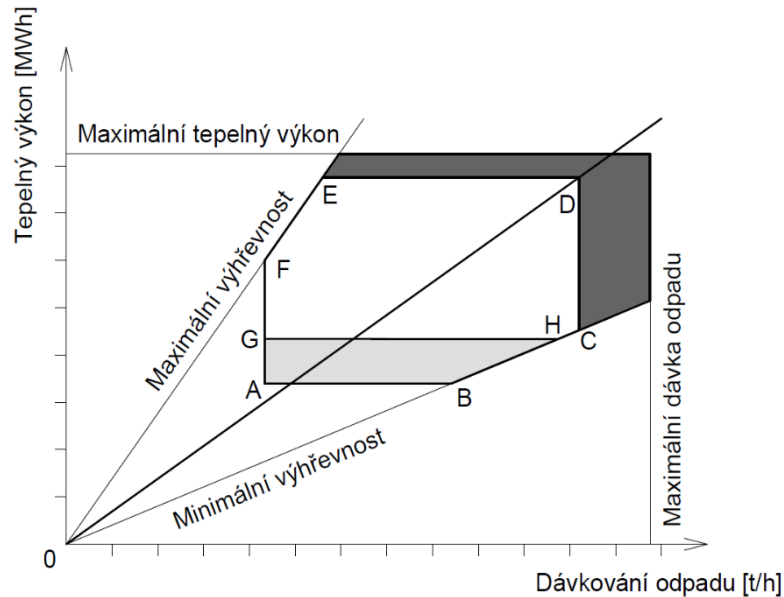
Z kapacity pramení hned první podmínka modelu

$$x \leq \frac{G}{FPD}, \quad (15)$$

kde  $x$  symbolizuje množství odpadu dávkovaného na spalovací rošt za hodinu a  $FPD$  je fond pracovní doby. Běžně se pohybuje kolem 8 000 hodin za rok a vyjadřuje plánovaný počet hodin, který má být zařízení za rok v provozu. Celkově má nepřestupný rok 8 760 hodin, takže 760 hodin (přibližně 1 měsíc) připadá na odstávky zařízení, ať už z důvodu pravidelné údržby nebo i náhlých odstávek z důvodu poruchy.

### 5.3.1 Parní kotel

I když by se mohlo zdát, že se jedná o podmínku pro soz odpadu, tak předchozí vztah vyjadřuje omezení dávkování odpadu na spalovací rošt. Provozní parametry kotle definují několik dalších podmínek, které vycházejí z diagramu, viz obr. 36.



Obr. 36 Diagram parního kotle (Janošťák, 2014)

Jedná se o omezení minimálního dávkování odpadu, definované spojnici AF. Přesná hranice závisí na zvoleném spalovacím roštu, ale pro podmínky modelu se uvažuje hodnota rovna 60 % z maximálního možného dávkování, viz (16).

$$x \geq 0,6 \cdot x_{max}. \quad (16)$$

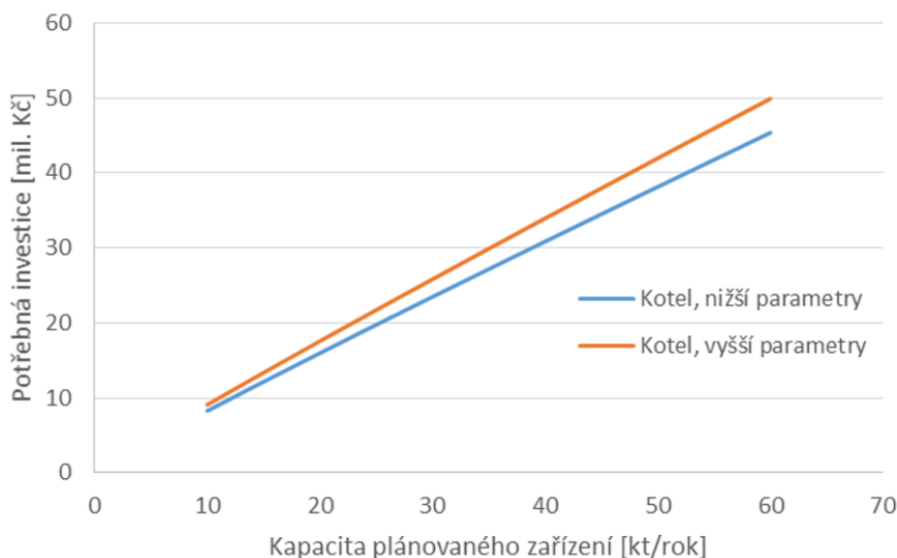
Další omezení (17) se vztahuje k parametru LHV. V případě výrazně nízké výhřevnosti se totiž musí podporovat spalováním zemního plynu v pomocných hořácích, které mají dostatečně rychlý náběh, aby na tyto případy byly schopny reagovat. Pro účely této práce se tato situace zatím zanedbává. Interval mezi minimální a maximální výhřevností se tedy uvažuje dostatečně velký, aby pokryl značnou variabilitu ve složení SKO.

Omezení v podobě maximálního a minimálního výkonu je ošetřeno výpočtem samotného tepelného výkonu uvolněného na roštu a celkového vyrobeného tepla, jelikož omezení vyplývá z dávkování.

$$v^B = x \cdot LHV \cdot \eta^B, \quad (17)$$

kde  $v^B$  je tepelný výkon kotle,  $\eta^B$  je jeho účinnost a  $LHV$  je odhadnutá výhřevnost odpadu. Výhřevnost se pro účely modelu uvažuje jako konstanta po celou dobu provozu. Její hodnota je odhadnuta pomocí nástroje Justine zmíněným v rešeršní části práce, viz (Szásziová, 2017). Použitý odhad výhřevnosti odpadu v ČR je stanoven na 9,2 GJ/t. Podobně též účinnost vstupuje do modelu jako konstanta, i když je její hodnota závislá na aktuálním tepelném výkonu. Ze zkušeností z reálných provozů byla hodnota zvolena na 84,5 %.

Podle typu kotle se liší také parametry vyráběné páry. Pára o vyšších parametrech se zde uvažuje s teplotou 330 °C a tlakem 2,5 MPa, pára o nižších parametrech s teplotou 230 °C a tlakem 1,3 MPa. Pro ZEVO s kapacitou nad 60 kt/r je nutné uvažovat kotel, který poskytuje páru o vyšších parametrech, ale pro nižší kapacity je možnost výběru. Kvalita vyráběné páry se projeví kladně na turbíně, ale způsobí zvýšení v potřebné investici, viz obr. 37. Osa x nedefinuje jmenovitý výkon kotle, ale popisuje rovnou velikost uvažovaného zařízení, pro které by byl kotel vhodný. Uveřejnění graf vychází z dat toku 2014.



**Obr. 37 Investice do parního kotle v závislosti na kapacitě navrhovaného ZEVO**

V závislosti na zvolené kapacitě, turbínách, počtu linek a dalších parametrech zařízení činila částka za parní kotel v roce 2014 přibližně 5–10 % z celkových investic. Nejedná se sice o výrazné zvýšení investic, ale i přesto je potřeba volbu kotle zvážit z pohledu celkových výhod.

### 5.3.2 Turbíny

Vyrobená pára může být distribuována přímo do tepelné sítě, ale obvykle část, případně veškerá, je vedena na turbínu/y. Základní typy turbín, se kterými se v předmětné oblasti běžně využívají, jsou kondenzační odběrová (KOT), KOT s odpojitelným kondenzačním stupněm a protitlaká (PT).

Důsledný matematický model by zahrnoval mnoho proměnných, a proto se ve většině dosavadních prací značně zjednodušuje. V závislosti na dostupných datech získaných z různých studií je potřeba rozlišovat u turbín následující parametry.

- Výkon (maximální a minimální výkon) –  $e^{TG} (e_{max}^{TG}, e_{min}^{TG})$  [MW<sub>e</sub>].
- Množství páry protékající turbínou –  $v_{in,i-1}^{TG}$  [t/h, MW<sub>t</sub>]
- Maximální a minimální hlnost –  $h_{max}, h_{min}$  [t/h, MW<sub>t</sub>].
- Procentuální zatížení turbíny (minimální) –  $z (z_{min})$  [%].
- Tlak v odběrové síti (tzv. protitlak) –  $q$  [MPa].
- Podíl vstupující páry do kondenzačního stupně a vystupující páry z prvního stupně turbíny (pouze u KOT) –  $o$  [%].

U protitlakých turbín se ukázalo, že pro popis jejich aktuálního výkonu je dostatečné uvažovat lineární vztah závislý na protitlaku a procentuálním vytížení turbíny:

$$e^{TG} = e_{max}^{TG} \cdot q_v \cdot z, \quad (18)$$



kde  $e_{max}^{TG}$  je stanoveno před výpočtem v závislosti na zvoleném kotli,  $q_v$  je pokles výkonu odvozený z regresního modelu závislém pouze na protitlaku  $q$  a jedinou proměnnou je tedy procentuální zatížení  $z$ . Snižující se účinnost v závislosti na snižujícím se zatížení je zde zanedbána.

Pro výpočet výkonu KOT s a bez odpojitelného kondenzačního stupně už se jednoduchý lineární vztah bohužel najít nepodařilo. Vzorec s dostatečnou přesností je tvaru

$$e^{TG} = (0,22 \cdot e_{max}^{TG} - 1,787) \cdot (-0,6452 \cdot o + 0,9968) \cdot (1,1999 \cdot z - 0,1999) \cdot (-0,048 \cdot o \cdot q + (0,2764 \cdot o + 1)), \quad (19)$$

kde  $e_{max}^{TG}$  je parametr stanovený před výpočtem,  $o$  je proměnná definující podíl vystupující páry z prvního stupně a vstupující páry do kondenzačního stupně a  $z$  je procentuální vytíženost turbíny. Jedná se tedy o nelineární vztah, který obsahuje násobení dvou spojitých proměnných, z nichž jedna je umocněna na druhou. Pro výpočet byl vztah (19) přeformulován do příhodnější podoby, viz (20).

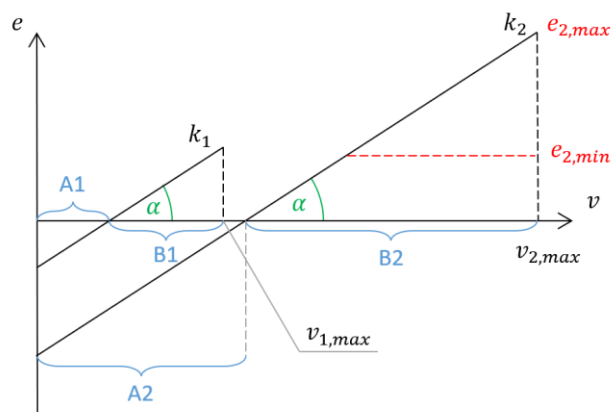
$$e^{TG} = ((e_{max}^{TG} - e_{min}^{TG}) \cdot (-1,35 \cdot o + 0,95) + e_{min}^{TG}) \cdot z, \quad (20)$$

ale i ten se nevyhnul násobení dvou spojitých proměnných. Pro modelování předem dané kapacity se vztahy dají použít, ale v případě, kdy kapacita hraje roli neznámé, by pro KOT docházelo k násobení tří spojitých proměnných, jelikož maximální a minimální výkon turbíny je na kapacitu vázaný. Pro PT by to znamenalo násobení dvou spojitých proměnných. Z důvodů řešitelnosti optimalizačních úloh musí být od zmíněných vztahů upuštěno. Obr. 34 navíc poukazuje na fakt, že příjmy za prodej elektrické energie nečiní příliš významnou část, takže se jako nejvhodnější varianta ukázalo ještě další zjednodušování.

Pro PT je možnost přejít k regresním lineárním modelům ve tvaru.

$$e^{TG} = \sum_{i=1}^2 a_i \cdot v_{in,i-1}^{TG}, \quad (21)$$

kde  $a_i$  jsou regresní koeficienty a  $v_{in,i-1}^{TG}$  je množství protékající páry. Aby však nedošlo k opětovnému násobení spojitých proměnných, tak regresní koeficient  $a_2$  byl zvolen tak, aby co možná nejlépe charakterizoval turbínu, avšak nebyl závislý na kapacitě ZEVO. Koeficient  $a_1$  se poté mění tak, aby zmíněný vztah zahrnoval i proměnnou účinnost v závislosti na využití výkonu turbíny, viz obr. 38.



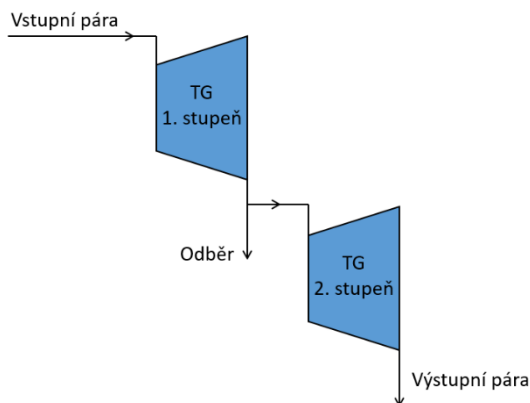
**Obr. 38 Modelování výkonu turbín pomocí regresních modelů**

Na obr. 38 jsou zobrazeny dvě křivky výkonu turbín  $k_1$  a  $k_2$ . Nárůst výkonu s přibývajícím množstvím protékající páry  $v$  se lineárně zvyšuje se směrnici tang  $\alpha$ , která zůstává konstantní. Stejně tak bylo ověřeno, že zůstává konstantní i poměr  $\frac{B}{A}$ . V závislosti na kapacitě ZEVO se tedy mění pouze regresní

koeficient  $a_1$  a hltnost turbíny. Je vidět, že představený vztah nelze používat v celém rozsahu osy  $v$ . Minimální množství vstupující páry  $v_{min}$  je potom definované pomocí minimálního možného zatížení (viz (22) a obr. 38)

$$e_{min}^{TG} = e_{max}^{TG} \cdot z_{min}, \quad (22)$$

které se běžně pohybuje kolem 40 %. U modelování KOT se postupuje jako při výpočtu dvou navazujících PT. Obr. 39 zachycuje schéma KOT se dvěma stupni, kde každá část je počítaná zvlášť.

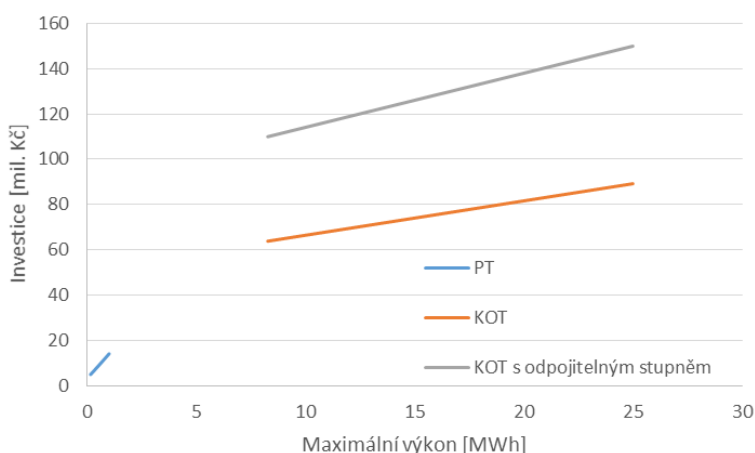


**Obr. 39 Schéma kondenzační odběrové turbíny**

Problém nastává v případech, kdy se uvažuje s možným vypínáním turbín. V takovém případě je potřeba ošetřit nereálné stavy jako například provoz pouze druhého stupně nebo samostatný provoz prvního stupně u KOT s neoddělitelným kondenzačním stupněm, což se řeší pomocí binárních proměnných – viz vztah (50).

Oproti předchozím přístupům modelování je tento výrazně jednodušší, ale nezahrnuje informaci o protitlaku v odběrové síti CZT. To znamená, že pro každý protitlak musí být vytvořeny nové regresní modely před výpočtem.

Investice do turbín byly odhadnuty v rámci činností širšího týmu ÚPI na základě dostupných studií, ze kterých vyplynula následující závislost, viz obr. 40. Graf vychází z cenových dat v roce 2014.



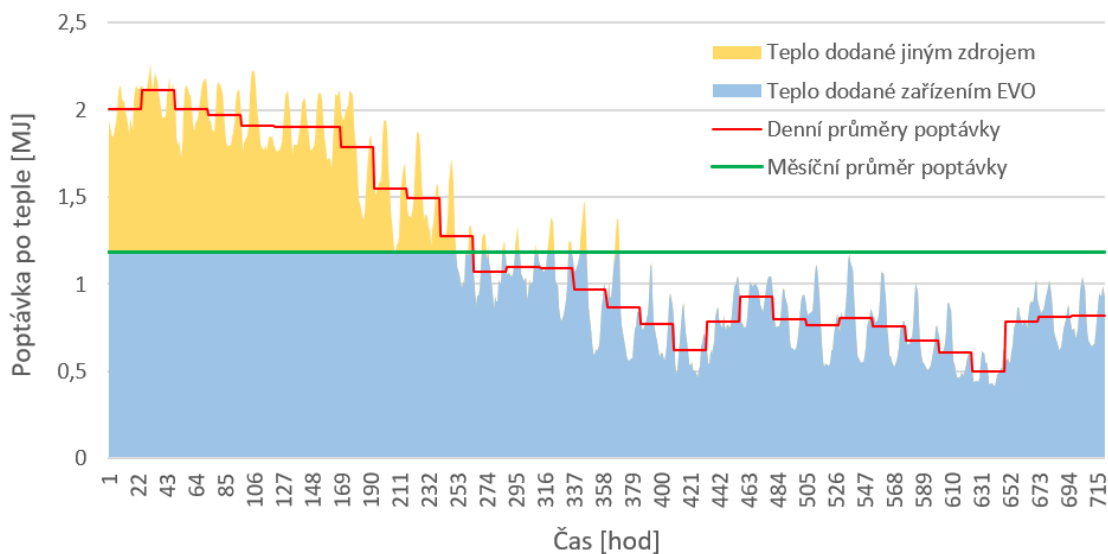
**Obr. 40 Potřebná investice turbín**

Protitlakové turbíny se uplatňují převážně u malých zařízení, takže se nepočítá s jejich návrhem pro větší výkony. Oproti tomu KOT najdou uplatnění i u větších zařízení. Je to hlavně díky možnosti přepínání orientace z tepla na elektrickou energii. U větších zařízení často dochází k případům, kdy vyrobené

teplo není kam uplatnit a jediná šance je jeho transformace na elektrickou energii, po které je přece jen poptávka celý rok stabilnější. Některá ZEVO mohou libovolně dodávat elektrickou energii do sítě, aniž by byla penalizována, ale v některých případech je hodnota dodávané energie pevně stanovená. V případě, že tato hodnota není dodržena, pak je dané zařízení finančně penalizováno. Vhodná volba turbíny může být jedno z řešení, jak těmto situacím předejít.

### 5.3.3 Poptávka po teple

Výstupní pára z turbín, nebo přímo z kotlů, nakonec putuje do sítě CZT k dalšímu využití. Každé CZT má jinou poptávku, která musí být naplněna. Jak již bylo zmíněno výše, poptávka po teple je uvažována jako známý parametr. Běžně se lze setkat s datovou základnou na měsíční úrovni, která je pro některé modely postačující. V některých člancích se dokonce pracuje s modely na roční bázi, ale pro přesnější výsledky je potřeba uchýlit se k bázi týdenní, denní či hodinové, jak popisuje tab. 2. Chyba, která vznikne zanedbáním dat na nižší časové úrovni než měsíční, lze popsat pomocí obr. 41.



**Obr. 41** Výkyvy poptávky po teple za jeden měsíc ve zvolené lokalitě

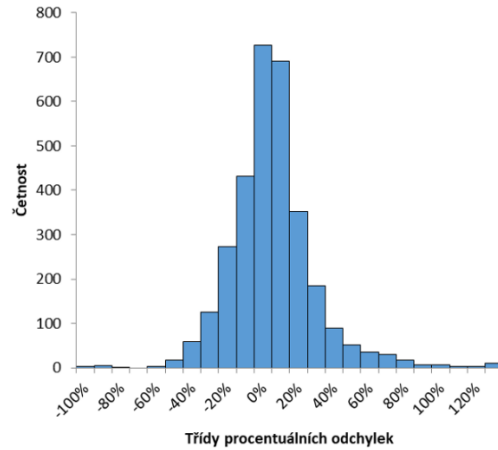
Na stejném obrázku je zelenou čarou zobrazena průměrná měsíční dubnová poptávka po teple ve vybraném městě ČR. Za předpokladu, že ZEVO je na ni dimenzované, tak představuje zelená čára také maximální možný tepelný výkon, které je zařízení schopno do sítě dodat. To znamená, že zařízení je schopno distribuovat pouze část tepla označenou modře. V tomto případě se jedná o 80 % z celkové měsíční poptávky. Zbýlé teplo (označeno žlutě) pak musí dodat jiný zdroj, což může být záložní kotelná nebo jiné tepelné zařízení, s nímž ZEVO spolupracuje. V každém případě to však znamená jistou finanční ztrátu. Naopak ve druhé části měsíce vzniká finanční ztráta tím, že hodnota reálné poptávky je pod uvažovanou úrovní a zařízení tedy nemůže distribuovat veškeré vyrobené teplo. Tyto nepřesnosti se tato práce snaží eliminovat přechodem na denní bázi, u které nedosahuje chyba tak velkých hodnot (viz červená čára).

U některých sítí CZT se lze setkat se situací, že nejsou k dispozici hodinová, případně denní data (nedostupnost z důvodu citlivosti dat, nedostatečného měření atd.). Další postup tedy zahrnuje tvorbu odhadu těchto dat, který povede ke zvýšení celkové přesnosti modelu. Zmíněný problém je řešený pomocí pravděpodobnostních rozdělení, které se snaží simulovat denní průběh poptávky na základě měsíčních průměrů.

ÚPI disponuje daty poptávky po teple na denní bázi z několika reálných provozů. Celkově je k dispozici 3 114 hodnot poptávky ze čtyř lokalit v období 2012–2015. Pro všechna data se vytvořila porovnávací proměnná  $\omega$ , která je definovaná pomocí (23).

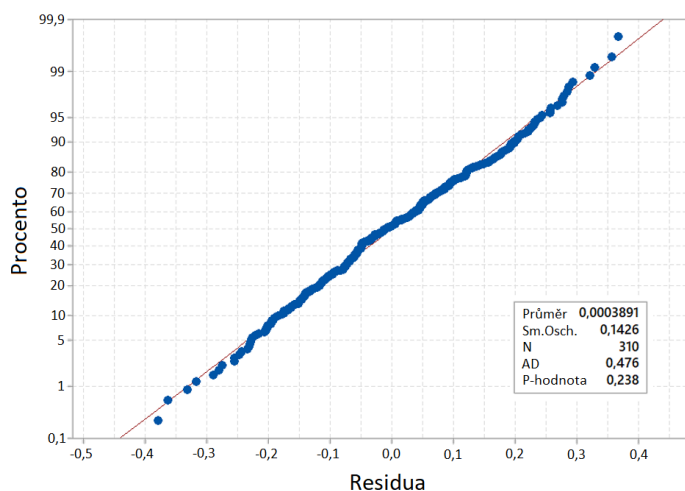
$$\omega = \frac{d^D - d^M}{d^M}, \quad (23)$$

kde  $d^D$ , resp.  $d^M$ , je denní průměr poptávky po teple získané z denních, resp. měsíčních dat.  $d^D$  i  $d^M$  jsou hodnoty v GJ/d. Histogram těchto odchylek je vidět na obr. 42.



**Obr. 42 Histogram procentuálních odchylek denních dat od měsíčních průměrů**

Tvarem se histogram blíží normálnímu rozdělení pouze okrajově a ani po odstranění podezřelých a odlehlých hodnot nedošlo k výraznému zlepšení. Jelikož zmíněná data popisují celý rok, přešlo se k myšlence, že pro každý měsíc se vygeneruje zvlášť jiné pravděpodobnostní rozdělení. Tento přístup se ukázal jako schůdnější, jak nakonec potvrdily i statistické testy normality. Testy se prováděly v softwaru Minitab17, který nabízí výběr z testů Kolmogorov-Smirnov, Ryan-Joiner nebo Anderson-Darling (AD). Pro většinu měsíců se ukázalo, že data by se dala modelovat pomocí normálního rozdělení, ale v některých měsících byl tento předpoklad bohužel vyvrácen. Je tedy nutné další přezkoumání, zda se jedná pouze o chyby v měření nebo je potřeba přestoupit k jinému pravděpodobnostnímu rozdělení. Obr. 43 ukazuje pravděpodobnostní graf pro měsíc únor při užití AD testu.



**Obr. 43 Test normality dle AD v softwaru Minitab (P-P graf)**

Kritická hodnota  $P$ -value vyšla vyšší než zvolená hladina významnosti 0,05, takže nelze zamítnout hypotézu, že data pocházejí z normálního rozdělení o parametrech  $N(\mu, \sigma^2)$ , kde  $\mu$  je rovna „Mean“

a  $\sigma$  „StDev“, viz obr. 43. Výsledná data poptávky potřebná pro výpočet se poté snadno odhadnou pomocí normálního rozdělení vztahem (24).

$$d^D = d^M \cdot [1 + N(\mu, \sigma^2)], \quad (24)$$

Výhodou je, že většina běžně dostupných softwarů (GAMS, Excel, STATISTICA, Minitab) umí normální rozdělení na základě parametrů generovat.

V případě, že je potřeba se zabývat lokalitou se sítí CZT, která nedisponuje nebo z jiných důvodů nemohla poskytnout přesnější než měsíční hodnoty poptávky po teple, je možné vygenerovat data na denní bázi převážně pomocí normálního rozdělení. Díky těmto datům se lze vyhnout nepřesnostem způsobeným zanedbáním výkonových špiček/propadů v poptávce po teple.

#### 5.3.4 Náklady, příjmy a investice

Většina z potřebných vztahů pro technický výpočet byla uvedena v předchozích částech, následující text se zabývá jejich propojením s finanční stránkou věci, jejíž výsledkem je očekávaný roční peněžní tok potřebný pro výpočet IRR.

První část tvoří celkové roční náklady, které se dají poskládat do jediného vztahu, viz (25).

$$n = n_{rez} + n_{gas} + n_{chem} + n_{wat} + n_{emp} + n_{rei} + n_{mai}, \quad (25)$$

kde  $n_{rez}$  jsou náklady spojené s nakládáním reziduí,  $n_{gas}$  jsou náklady na zemní plyn,  $n_{chem}$  představuje náklady na chemikálie potřebné pro správnou funkci systému čištění spalin,  $n_{wat}$  jsou náklady na vodu,  $n_{emp}$  značí náklady na zaměstnance,  $n_{rei}$  představuje náklady na potřebné reinvestice v průběhu životnosti a  $n_{mai}$  symbolizuje náklady na údržbu ZEVO. Většina nákladů je vztažena na jednotku zpracovaného odpadu  $x$ , viz rovnice (26).

$$n_{rez} + n_{gas} + n_{chem} + n_{wat} = x \cdot (0,236 \cdot \varphi_{rez} + 2 \cdot \varphi_{gas} + \varphi_{chem} + 0,6 \cdot \varphi_{wat}), \quad (26)$$

kde  $\varphi$  pro indexy  $rez, gas, chem, wat$  vyjadřují ceny za jednotku dané komodity. Náklady na zaměstnance jsou dány vztahem (27).

$$n_{emp} = 12 \cdot b \cdot \varphi_{zam}, \quad (27)$$

Kde  $\varphi_{zam}$  jsou měsíční náklady na jednoho zaměstnance a  $b$  je počet zaměstnanců potřebný na provoz zařízení definovaný vztahy (28) a (29). Počet zaměstnanců vychází z kapacity zařízení  $C$ .

$$b = 0,07 \cdot C + 13,3 \text{ pro } C \leq 80, \quad (28)$$

$$b = 52 \text{ pro } C > 80. \quad (29)$$

Náklady na reinvestice jsou stanoveny procentuálně k celkové počáteční investici a týkají se pouze některých let, takže jejich vztah lze vyjádřit pouze k danému roku (Ucekaj, 2010). Stejně tak i výše nákladů na údržbu je definována procentuálně, ale její výše se dělí podle toho, zda se jedná o stavební část nebo o část strojní. Hodnota stavební části, ze které se odvozují náklady na údržbu zařízení, zůstává konstantní, zatímco hodnota strojní části je zvyšována reinvesticemi, které byly do té doby provedeny.

Druhá část zahrnující finance je příjmová, opět je možno zapsat celkové roční příjmy pomocí jediného vztahu, viz vztah (30).

$$p = p_{scr} + p_{was} + p_{heat} + p_{el}, \quad (30)$$

kde  $p_{scr}$  jsou příjmy za prodej železného šrotu,  $p_{was}$  za zpracování odpadu,  $p_{heat}$  za prodej tepelné energie v podobě páry či horké vody a  $p_{el}$  za prodej elektrické energie. Po rozepsání (30) se dojde ke vztahům (31) až (33).

$$p_{scr} + p_{was} = x \cdot (0,06 \cdot \varphi_{scr} + \varphi_{was}), \quad (31)$$

$$p_{heat} = y^{HU} \cdot \varphi_{heat}, \quad (32)$$

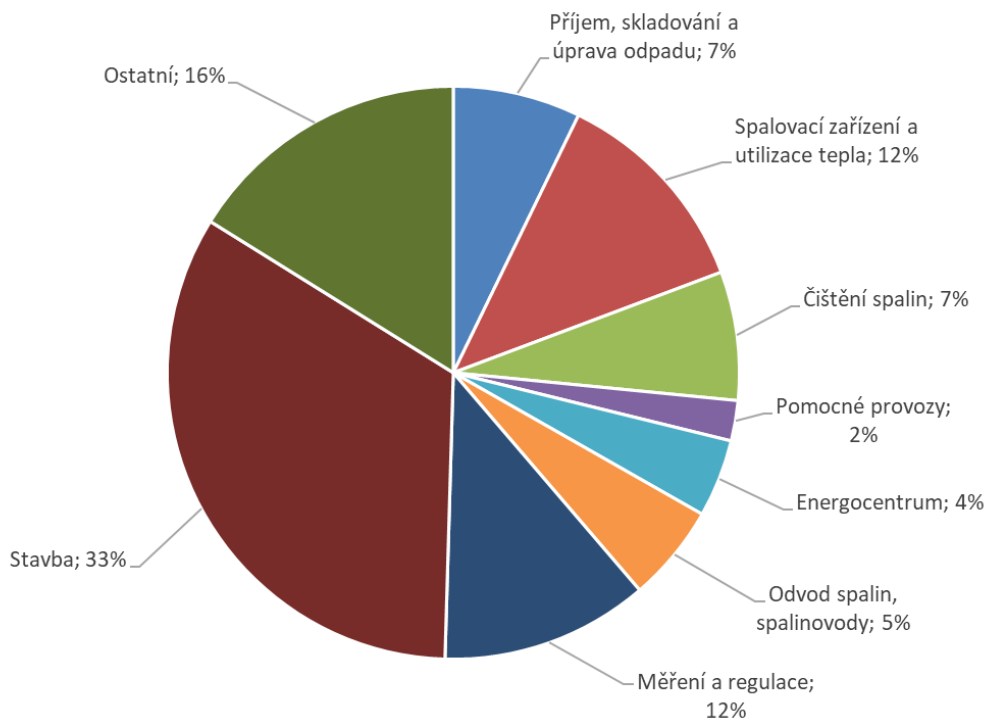
$$p_{el} = e \cdot \varphi_{el}, \quad (33)$$

kde  $\varphi$  pro indexy  $scr, was, heat, el$  vyjadřují cenu za jednotlivé komodity a  $y^{HU}$  vyjadřuje množství páry, která putuje ke spotřebitelům (HU – heat user).

Celkový tok peněz  $CF$  jde tedy vyjádřit prostým rozdílem příjmů a nákladu. Jediné, co je potřeba dopočítat, aby mohlo být vyjádřeno IRR, je celková investice potřebná na výstavbu zařízení, viz (34).

$$I = I_B + I_{TG} + I_S + I_C, \quad (34)$$

kde celková investice  $I$  se skládá z investice potřebné na kotel  $I_B$ , turbínu  $I_{TG}$ , bunkr ke skladování odpadu  $I_S$  a další potřebné investice  $I_C$ . Investice  $I_B, I_{TG}, I_S$  jsou uvedeny zvlášť, jelikož parametry kotle, turbíny a bunkru nejsou nutně vázány na kapacitu, i když ze zvolené kapacity vyplývá jejich jisté doporučení. Investice  $I_C$  zahrnují například samotnou stavbu zařízení, systém na čištění spalin a další náklady, které se přímo vztahují ke kapacitě, a proto jsou uvedeny takto souhrnně. Příklad rozvržení potřebných investic pro ZEVO o kapacitě 10 kt/r v roce 2014 je na obr. 44.



**Obr. 44 Rozvržení investic u ZEVO s kapacitou 10 kt**

Nyní už se lze vrátit k výpočtu IRR, jehož vzorec lze přepsat do tvaru (35).

$$I = \sum_{r=1}^n \frac{n_r - p_r}{(1 - IRR)^r}, \quad (35)$$

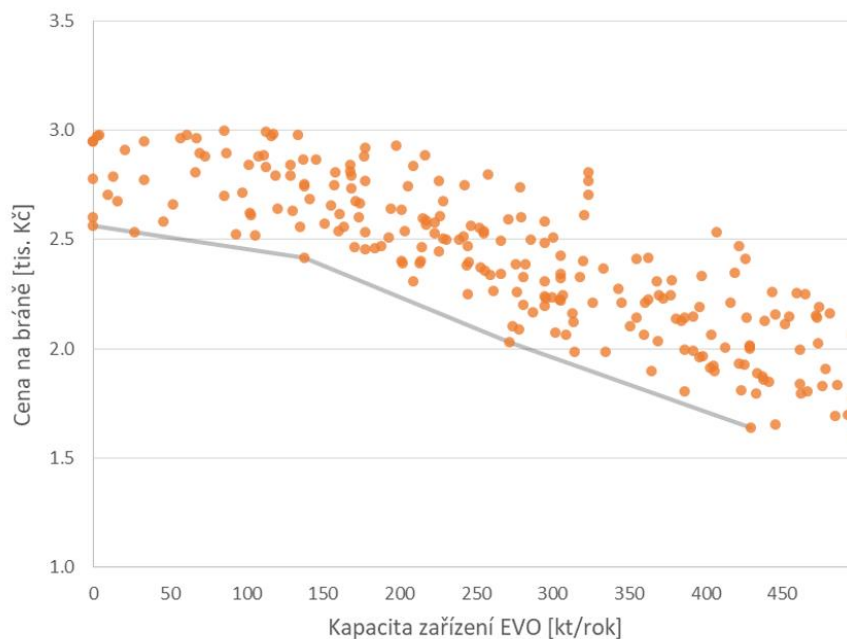
kde  $n_r$ , resp.  $p_r$ , jsou roční náklady, resp. příjmy, ZEVO popsané v předchozích vztazích (25) a (30). Samozřejmě parametry modelu se mění v závislosti na aktuálním roce, tedy ceny jednotlivých komodit

se zvyšují úměrně průměrné inflaci, poptávka po teple se také může měnit podle aktualizace CZT a samozřejmě výhřevnost odpadu, která se mění v závislosti na aktuálních obalových materiálech apod. To už je potom zahrnuto do vhodného nastavení výpočetních scénářů.

Problémy při modelování jsou velmi často způsobeny nedostatečnou datovou základnou. Při pohledu na všechny dosavadně sepsané vztahy tvoří největší problém získání následujících dat.

- výhřevnost odpadu,
- cena za zpracování odpadu,
- cena za prodej tepla.

Jak již bylo zmíněno výše, pro výpočet odhadu výhřevnosti v daném roce se používá nástroj Justine, takže tato práce uvažuje hodnotu jako odhadnutou a jejímu dalšímu zkoumání nevěnuje větší pozornost. Cena za zpracování odpadu je silně závislá na množství, které je schopno zařízení zpracovat, tedy na její kapacitě  $C$ . Pro odhad tohoto parametru slouží nástroj NERUDA. Princip nástroje spočívá v minimalizaci celkových nákladů na zpracování a svoz odpadu pro zvolené území. Může se například jednat o celou ČR s částí jejich sousedících států. Pro toto území se minimalizují celkové náklady na svoz a zpracování odpadu. Z výsledků lze poté odečíst cenu na bráně (=cena za zpracování odpadu), za kterou se zařízení podařilo získat dané množství odpadu. Jelikož NERUDA provádí opakované výpočty pro různé scénáře je výsledkem bodový graf, viz obr. 45. Dostupnosti odpadu se detailněji věnoval (Ferdan, 2015).



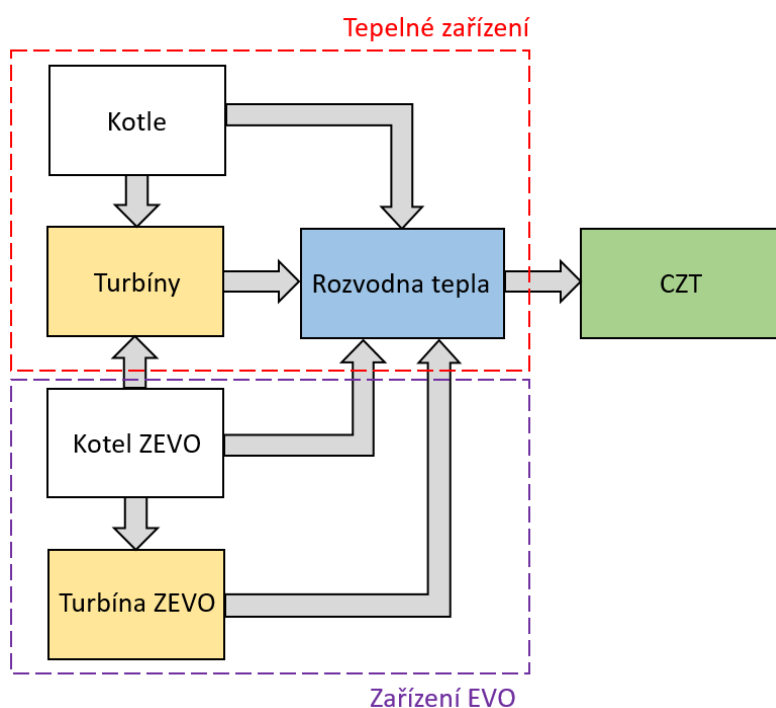
**Obr. 45 Příklad závislosti ceny na bráně na kapacitě**

Obr. 41 zachycuje závislost ceny na bráně v závislosti na množství odpadu pro jednu zvolenou lokalitu. Je vidět, že s narůstajícím množstvím cena postupně klesá, jelikož odpad musí být dovážen z odlehlejších lokalit, které by při vyšší ceně zvolily raději svoz do bližšího zařízení. Pro výpočet jsou důležité okrajové hodnoty, které definují nejhorší možnou situaci. Samozřejmě je možnost uvažovat i regresní křivku všech bodů grafu, pak je ale za jistých podmínek větší šance, že se nepodaří zajistit pro zařízení dostatek odpadu, což by značně narušilo celou ekonomiku a chod ZEVO. Spojnice krajových bodů je zobrazena šedě. Pomocí této lineárně-lomené křivky, případně pomocí jiné funkce popisující krajové body, se určuje cena na bráně vstupujícího do modelu ZEVO.

Poslední špatně určitelnou hodnotou je cena tepla. Doposud se volila na základě expertních odhadů a konzultací přímo s danou lokalitou. Součástí této práce je proto navrhnout nástroj na její určení. Vzhledem k tomu, že se neuvažuje, že by vzniklo ZEVO doslova na zelené louce bez napojení na CZT, byl vyvinut postup na její výpočet využívající znalosti tepelného zařízení, které stojí v potenciálním místě budoucí výstavby ZEVO.

## 5.4 Výpočet ceny tepla

V této fázi už se kalkuluje s dalším tepelným zařízením. Pro výpočet stačí uvažovat pouze velmi zjednodušeně, že zařízení je vybaveno určitým počtem kotlů, turbín a má definovanou síť CZT s danou poptávkou. K této síti se připojí ZEVO. Zjednodušené schéma obecného propojení tepelného zařízení a ZEVO je zobrazeno na obr. 46.

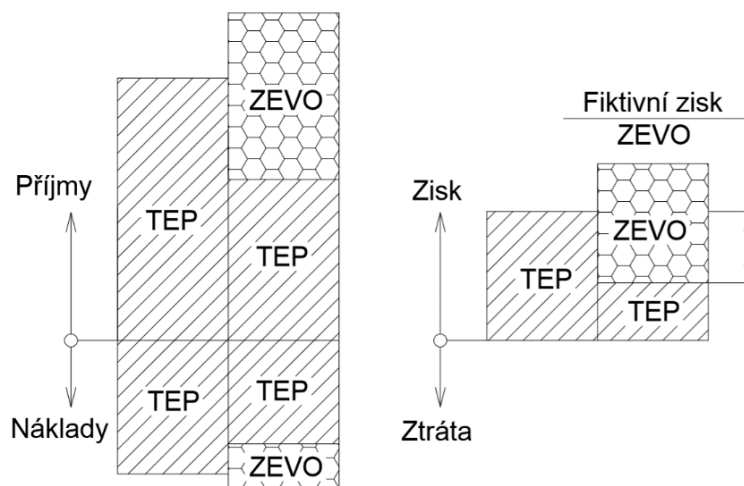


**Obr. 46 Schéma připojení ZEVO k jinému tepelnému zařízení**

Z pohledu teplárenského systému je mnoho možností, jak ZEVO integrovat. Je potřeba přesně definovat, zda ZEVO bude využívat turbíny patřící k jinému tepelnému zařízení nebo bude používat pouze svoji turbínu. Pokud je k dispozici více sítí CZT, je nutné vymezit, do které z nich bude ZEVO dodávat teplo (například z pohledu parametrů páry). Veškerá pára, kterou ZEVO vyrobí, však putuje do CZT přes rozvodnu tepelného zařízení, které ji až poté posílá dále. Cena tepla, která je cílem tohoto výpočtu, není ta pro konečného spotřebitele, ale jedná se o cenu na patě ZEVO. Jde tedy o vyjádření hodnoty, za kterou je teplo tzv. prodáváno ze ZEVO do tepelného zařízení. Nejedná se o prodej v pravém slova smyslu, ale pouze o pomocné vyjádření ceny tepla pro výpočet zhodnocení investice ZEVO.

Princip celého výpočtu tkví v myšlence přerozdělení zisku. Při připojení ZEVO přijde původní tepelné zařízení o část poptávky po teple. Zároveň se mu ale sníží variabilní náklady v podobě spotřebovaného paliva a obecně sníženým provozem kotlů. Většinou ušetřené náklady bývají na podstatně nižší úrovni než ztracené příjmy za prodané teplo. Celkový ušlý zisk tedy musí být kompenzován ZEVO. Zobrazení principu je na obr. 47.





**Obr. 47 Výnosy/náklady a zisk/ztráta samostatného tepelného zařízení (TEP) a jeho koexistenci se ZEVO (Janoščík, 2016b)**

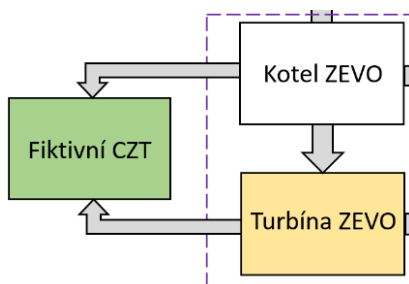
Jak je vidět z obrázku, tak při stejné ceně tepla, za jakou ji prodává tepelné zařízení, by pro ZEVO vznikl relativně velký zisk, který však jde rozdělit do dvou částí. Jedna popisuje reálný zisk ZEVO a druhá musí být odevzdána tepelnému zařízení (fiktivní zisk, viz obr. 47), aby byla zachována jeho ekonomická neutralita. Společně s kolegy na ÚPI byl vyvinut nástroj, který se snaží spočítat reálný zisk ZEVO (Janoščík, 2018).

Úloha se skládá ze dvou částí. V první části se spočítá celkový zisk z prodeje tepla dosavadního zařízení a následně se spočítá zisk pro společný chod zařízení se ZEVO. Podstata spočívá v tom, že se počítají pouze variabilní náklady spojené s výrobou potřebného tepla a elektřiny, které jsou definovány pomocí rovnice (36).

$$n_{var} = n_{tep} - p_{el}, \quad (36)$$

kde  $p_{el}$ , jsou stejně jako u ZEVO příjmy za prodej elektřiny a  $n_{tep}$  jsou variabilní náklady spojené s výrobou tepla z kotlů tepelného zařízení (např. zemní plyn, černé uhlí).

Následně se výpočet opakuje s připojeným ZEVO. Příjmy za elektřinu jsou doplněny o člen zahrnující vyrobenou elektrickou energii ZEVO. Člen nákladů  $n_{var}$  se snižuje, jelikož část poptávky po teple převzalo ZEVO. Je důležité přesně zjistit, o jakou část se jednalo, jelikož je možné, že podmínka minimálního výkonu kotlů tepelného zařízení způsobí, že společně se ZEVO vyrobí více tepla, než je poptávka po něm. Potom by mělo dojít k tomu, že upřednostňováno bude teplo z tepelného zařízení. Současně se tedy uvažuje fiktivní CZT pro modelování přebytků tepla, tzv. jeho maření. V modelu se tento aspekt zajistí přidavnou podmínkou, dle obr. 48. Je nutné upozornit, že do nákladů  $n_{var}$  nevstupuje palivo v podobě odpadu, které se zpracuje v ZEVO, jelikož se nejedná o náklady, ale o příjmy.



**Obr. 48 Schéma fiktivního CZT potřebného pro výpočet**

Kromě možného toku páry ze ZEVO na turbíny případně do rozvodny tepla je zavedeno další fiktivní CZT, do kterého může dodávat pouze ZEVO. Aby bylo toto fiktivní zakončení skutečně využíváno, je ve výpočtu zhodnoceno fiktivní cenou za teplo. Tato fiktivní cena má tak nízkou úroveň, že nedojde ke zkreslení výsledků v podobě dodávky tepla. Avšak i tato úroveň stačí na to, aby byl tok využíván. To znamená, že do předchozího vztahu přibude nový člen, viz rovnice (37).

$$p_{fikt} = d_{fikt} \cdot \varphi_{fikt}, \quad (37)$$

kde  $d_{fikt}$  je proměnná vyjadřující kolik tepelné energie vyrobené ZEVO bylo zmařeno ve fiktivním toku a  $\varphi_{fikt}$  je fiktivní prodejní cena za tuto energii. Tímto způsobem se spočítají náklady z první a druhé části ( $n_{var}^{TEP}$  a  $n_{var}^{ZEVO}$ ), které se následně odečtou, viz vtaž (38):

$$n_{dif} = n_{var}^{TEP} - n_{var}^{ZEVO} = p_{el} - p_{el}^{ZEVO} - n_{tep} + n_{tep}^{ZEVO} - d_{fikt} \cdot \varphi_{fikt}. \quad (38)$$

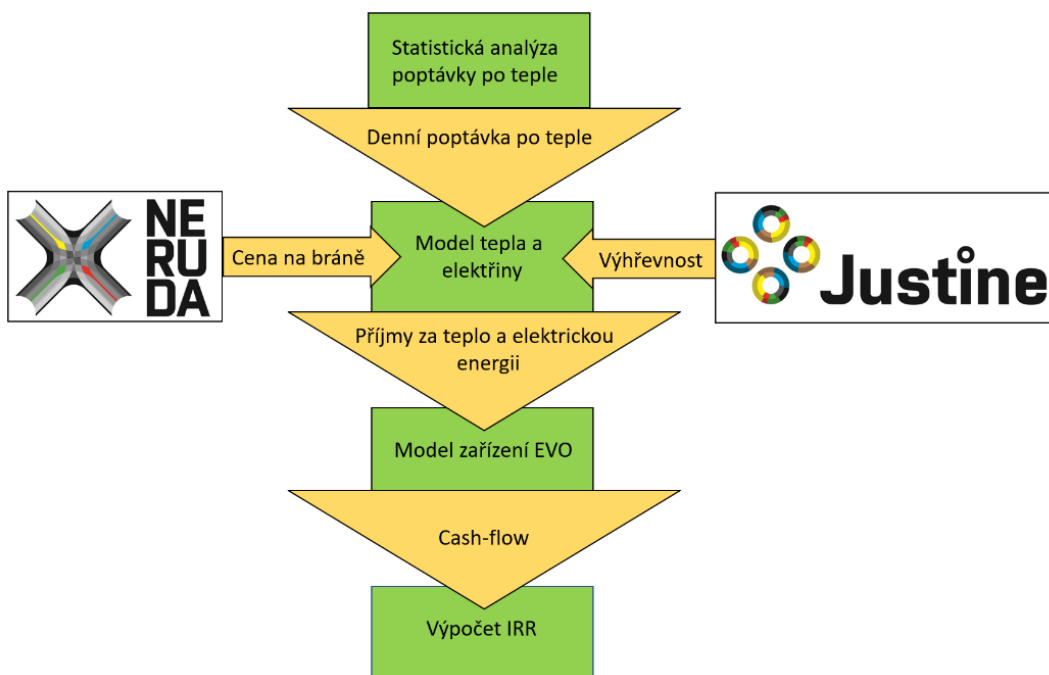
Po eliminaci nereálného příjmu vzniklého fiktivním CZT se dojde k hodnotě  $n_{dif}$ , která přesně popisuje zisk za teplo a prodanou elektřinu, který si může ZEVO nárokovat. V případě, že by byl vznesen požadavek na výpočet ceny tepla na patě ZEVO, nebyl by problém tuto hodnotu dopočítat pomocí vztahu (39).

$$\varphi_{heat,ZEVO} = \frac{n_{dif}}{y_{ZEVO}^{HU}}, \quad (39)$$

kde  $y_{ZEVO}^{HU}$  vyjadřuje množství páry, která byla dodána ze ZEVO do reálného CZT. Pro účely této práce je však postačující znát hodnotu  $n_{dif}$ . Z přístupu lze vidět, že není potřeba znát cenu tepla, za kterou tepelné zařízení teplo poskytuje. Jedná se zde o úsporu v podobě nákladů na palivo tepelného zařízení.

## 5.5 Technicko-ekonomický model kooperace zařízení

V následující kapitole bude podrobně rozepsáno celkové schéma výpočtu IRR pro ZEVO, které se plánuje připojit ke stávajícímu teplárenskému zařízení. Schéma výpočtu je zobrazeno na následujícím obr. 49. Více o nástrojích NERUDA a Justine je uvedeno v příloze této práce.



Obr. 49 Výpočtové schéma celého modelu

Princip spočívá v odhadu poptávky po teple, která se převede na denní průměry (viz sekce Poptávka po teple v kap 5.3). Pokud se jedná o data na bázi kratších časových úseků (hodiny, dny, týdny), pak se jedná o elementární úlohu. Pokud jsou data dostupná pouze za delší časové úseky, pak je potřeba přistoupit k odhadu pomocí statistického rozdělení. Dále se za pomoci dostupných nástrojů NERUDA a Justine odhadne cena na bráně a výhřevnost odpadu (viz sekce Náklady, příjmy a investice v kap. 5.3). Pak se přechází k modelu tepla a elektřiny, který zahrnuje veškeré informace o tepelném zařízení (počet kotlů, typ paliva, cena paliva, počet turbín a jejich výkonové křivky, (obdobné vztahy jako v sekcích Parní kotel a Turbíny, viz kap. 5.3)) a rovněž se zvolí možná kapacita ZEVO. Výsledkem je hodnota  $n_{dif}$ , která je složena z příjmů za elektrickou a tepelnou energii, kterou si může ZEVO nárokovat (viz kap. 5.4). Tato hodnota je potom vstupní do modelu ZEVO, kde už jsou brány v potaz veškeré vztahy zmíněné dříve (kap. 5.3, kap. 5.4). Výhodou je, že hodnota  $n_{dif}$  nahradí součet  $p_{heat} + p_{el}$ , takže není třeba ho znovu v modelu uvažovat. Výsledkem jsou peněžní toky v jednotlivých letech, které vstupují do výpočtu IRR.

### 5.5.1 Matematický zápis modelu

#### Množiny

$I$	množina kotlů
$J, L$	množiny turbín
$K$	množina CZT
$F$	množina turbín a CZT ( $F = J \cup K$ )
$T, R$	množina dnů, let

#### Parametry

$\varphi_{el,r}$	prodejní cena za elektrickou energii
$\varphi_{tep,i,r}$	náklady spojené s provozem jednoho kotle
$a_{1,j}, a_{2,j}$	regresní koeficienty modelu turbín
$d_{k,t,r}^D$	denní poptávka po teple
$G$	kapacita ZEVO
$\eta_j^{TG}, \eta_i^B$	účinnost turbín, kotlů
$h_{min,j}^{TG}, h_{max,j}^{TG}$	minimální a maximální hltnost turbín
$v_{min,i}^B, v_{max,i}^B$	minimální a maximální výkon kotlů
$\delta_{j,f}^{TG}, \delta_{i,f}^B$	parametry definující propojení turbín, kotlů k turbínám a CZT
$\tau_j^{TG}, \tau_i^B$	parametry definující, zda se daná turbína, kotel může odstavovat v průběhu provozu
$\rho_{j,l}^{TG}$	parametr určující víceetupňové turbíny
$SD$	binární parametr definující odstávku ZEVO
$\varphi_{fikt}$	fiktivní cena za zmařenou páru

**Proměnné**

$n_{var,r}$	rozdíl nákladů na provoz kotlů a příjmů za prodanou elektrickou energií
$Z$	$n_{var,r}$ za celou dobu životnosti projektu
$n_{tep,i,t,r}$	náklady na provoz kotlů
$e_{j,t,r}^{TG}$	vyrobená elektrická energie
$d_{fikt,t}$	zmařená pára ze ZEVO
$v_{i,t,r}^B$	tepelný výkon kotlů
$y_{i,f,t,r}^B, y_{j,f,t,r}^{TG}$	tepelné toky z kotlů, turbín
$\theta_{i,t}^B, \theta_{j,t}^{TG}$	binární proměnné definující odstávku/provoz kotlů, turbín
$v_{in,j,t,r}^{TG}$	tepelný výkon v podobě páry vstupující do turbíny
$v_{out,j,t,r}^{TG}$	tepelný výkon za turbínou
$u_{j,t,r}$	zmařená pára za turbínou
$x_{i,t,r}$	množství zpracovaného odpadu

Výsledný model definující úlohu je popsán pomocí následujících vztahů

$$\min Z = \sum_r n_{var,r} \quad (40)$$

za podmínek

$$n_{var,r} = 24 \cdot \sum_t \left( \sum_i n_{tep,i,t,r} - \sum_j e_{j,t,r}^{TG} \cdot \varphi_{el,r} - d_{fikt,t} \cdot \varphi_{fikt} \right), \quad (41)$$

$$n_{tep,i,t,r} = \varphi_{tep,i,r} \cdot v_{i,t,r}^B, \quad \forall i \in I \setminus \{ZEVO\}, \forall t \in T, \forall r \in R, \quad (42)$$

$$v_{i,t,r}^B = \sum_f y_{i,f,t,r}^B, \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall r \in R, \quad (43)$$

$$\theta_{i,t}^B \cdot v_{min,i}^B \leq v_{i,t,r}^B \leq v_{max,i}^B \cdot \theta_{i,t}^B, \quad \forall i \in I \setminus \{EVO\}, \forall t \in T, \forall r \in R, \quad (44)$$

$$\theta_{i,t}^B \geq \tau_i^B, \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall r \in R, \quad (45)$$

$$e_{j,t,r}^{TG} = a_{1,j} \cdot v_{in,j,t,r}^{TG} + a_{2,j} \cdot \theta_{j,t}^{TG}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T, \forall r \in R, \quad (46)$$

$$\theta_{j,t}^{TG} \cdot h_{min,j}^{TG} \leq v_{in,j,t,r}^{TG} \leq h_{max,j}^{TG} \cdot \theta_{j,t}^{TG}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T, \forall r \in R, \quad (47)$$

$$\theta_{j,t}^{TG} \geq \tau_j^{TG}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T, \forall r \in R, \quad (48)$$

$$\theta_{j,t}^{TG} \geq \tau_j^{TG} \cdot SD, \quad \forall j \in J \cap \{ZEVO\}, \forall r \in R, \quad (49)$$

$$\theta_{j,t}^{TG} = \sum_l \theta_{l,t}^{TG} \cdot \rho_{j,l}^{TG}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T, \forall r \in R, \quad (50)$$

$$v_{in,j,t,r}^{TG} = \sum_i y_{i,j,t,r}^B + \sum_j y_{l,j,t,r}^{TG}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T, \forall r \in R, \quad (51)$$

$$v_{out,j,t,r}^{TG} = v_{in,j,t,r}^{TG} - \frac{e_{j,t,r}^{TG}}{\eta_j^{TG}}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T, \forall r \in R, \quad (52)$$

$$v_{out,j,t,r}^{TG} = u_{j,t,r} + \sum_f y_{j,f,t,r}^{TG}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T, \forall r \in R, \quad (53)$$

$$\frac{d_{k,t,r}^D}{24 \cdot 3,6} \leq \sum_j y_{j,k,t,r}^{TG} + \sum_i y_{i,k,t,r}^B, \quad \forall k \in K = F \setminus J, \forall t \in T, \forall r \in R, \quad (54)$$

$$y_{j,f,t,r}^{TG} \leq \delta_{j,f}^{TG} \cdot h_{max,j}^{TG}, \quad \forall i \in I, \forall f \in F, \forall t \in T, \forall r \in R, \quad (55)$$

$$y_{i,f,t,r}^B \leq \delta_{i,f}^B \cdot v_{max,i}^B, \quad \forall i \in I, \forall f \in F, \forall t \in T, \forall r \in R, \quad (56)$$

$$v_{i,t,r}^B \leq \frac{G \cdot LHV \cdot \eta_i^B}{3,6 \cdot FPD}, \quad i = ZEVO, \forall t \in T, \forall r \in R, \quad (57)$$

$$x_{i,t,r} \leq \frac{G}{FPD} \cdot \theta_{i,t}^B, \quad i = ZEVO, \forall t \in T, \forall r \in R, \quad (58)$$

$$v_{i,t,r}^B + d_{fikt,t} = \frac{x_{i,t,r} \cdot LHV \cdot \eta_i^B}{3,6}, \quad i = ZEVO, \forall t \in T. \quad (59)$$

Rovnice (40) popisuje optimalizovanou proměnnou. Jedná se minimalizaci ročních variabilních nákladů spojených s výrobou tepla a elektřiny za celou dobu životnosti projektu. Rovnice (41) vychází ze vztahu (36) popsaného v kap. 5.4. Variabilní roční náklady spojené s výrobou tepla a elektřiny se spočítají pomocí nákladů na provoz kotlů (42), příjmů za elektřinu a fiktivních příjmů. Příjmy za elektřinu se skládají z vyrobené elektrické energie (46) a cenou za její jednotku. Podrobný popis výpočtu elektrické energie je popsán v kap. 5.3.2. Fiktivní příjmy vychází z dřívějšího popisu u rovnice (37). Rovnice (43) popisuje větvení tepelné energie z parního kotle na turbíny. Rovnice (44) popisuje výkonové omezení kotle. Obdobně je omezení definováno pro turbíny, viz (47). Proměnné  $\theta_{i,t}^B$  ( $\theta_{j,t,r}^{TG}$ ) jsou binární a definují, zda je parní kotel (turbína) v provozu. Parametru  $\tau_i^B$  ( $\tau_j^{TG}$ ) určuje, zda je odstavení parních kotlů (turbín) v průběhu provozu možné. (49) je obohacena ještě o parametr  $SD$ , definující odstávku ZEVO. Pokud je ZEVO v odstávce, tak musí být všechny turbíny odstaveny. Jak již bylo zmíněno v kap. 5.3.2, některé turbíny mohou být KOT, takže se modelují jako dvě nezávislé turbíny, u kterých však musí být zajištěno, že pokud se točí jedna, pak se točí i druhá. To zajišťuje rovnice (50). Vztah (51) definuje propojení mezi kotli a turbínami, tedy určuje, kudy může proudit pára. Obdobně (53) udává propojení mezi turbínami a systémem CZT. (52) znázorňuje výstupní tepelnou energii za turbínou. Je definovaná jako vstupní energie minus elektrická energie vyrobená na turbíně se započítáním elektromechanické účinnosti. Rovnice (54) dává do nerovnosti poptávku po páře v CZT a vyrobenou páru z kotlů a turbín, která do CZT může vstupovat. Nerovnost je zde proto, že poptávka musí být vždy naplněna, ale nadvýroba páry možná je. V takovém případě se musí pára mařit. Maření páry je blíže popsáno v kap. 5.4 u obr. 48. Konstanta 3,6 je zde uvedena kvůli přepočtu MWh<sub>t</sub> na GJ/t a 24 z důvodu přepočtu poptávky na hodinovou bázi. Rovnice (55) a (56) omezují maximální tok mezi turbínami a parními kotli. (57) a (58) popisují parní výkon kotle a dávkování odpadu. Vychází z rovnic (15) a (17), které jsou popsány na začátku kap. 5.3. Poslední rovnice modelu (59) také definuje parní výkon kotle, ale pomocí proměnné  $d_{fikt,t}$  zajišťuje, že může dojít k nadvýrobě tepelné energie, která se sice bude muset mařit, ale z hlediska splnění poptávky to může být nutné (podmínka minimálního výkonu parního kotle).

Poprvé proběhne výpočet s odstaveným ZEVO, tedy s nulovou kapacitou a archivují se hodnoty  $n_{var,r}$  jako  $n_{var,r}^{TEP}$ , následně se výpočet opakuje se zvolenou variantou ZEVO (kapacita, typ turbíny, typ kotle atd.) a opět se archivují hodnoty  $n_{var,r}$ , které se přejmenují na  $n_{var,r}^{ZEVO}$ . Po jejich odečtení a následném přičtení všech nákladů a příjmů spojených s provozem ZEVO se dostává rovnou hodnota  $CF_r$  jako

$$CF_r = p_{scr,r} + p_{was,r} - n_{var,r}^{TEP} + n_{var,r}^{ZEVO} - n_{rez,r} - n_{gas,r} - n_{chem,r} - n_{wat,r} - n_{emp,r} - n_{rei,r} - n_{mai,r}, \quad (60)$$

kteřá vstupuje do výpočtu IRR. Zmíněný postup ukazuje výpočet IRR jedné varianty ZEVO pro jeden scénář. Pro kvalitní rozvahu o výstavbě nového ZEVO je tento postup potřeba opakovat pro veškeré možné scénáře a varianty ZEVO. Už samotný výpočet pro jedinou variantu a scénář vykazuje vysokou výpočtovou náročnost, takže je potřeba pomocí vhodných algoritmů celý tento proces zjednodušit a při opakovaných výpočtech ideálně využít paralelizaci výpočtů. Navíc takto postavený model není schopen pracovat korektně s možností odstavení kotlů tepelného zařízení. Zatím nebyla nalezena vhodná podmínka, která by šla implementovat do modelu pro obecné řešení této problematiky. Prozatím byly identifikovány dva způsoby, jak danou problematiku řešit. Jednou je uvažovat striktně definovanou minimální dobu odstávky a druhou je práce s finanční nákladností odstávky, takže její minimální doba se může měnit v závislosti na úspoře variabilních nákladů, kterou způsobí. Implementace do modelu však přesahuje rámec této práce a je ponechána budoucímu výzkumu.

## 5.6 Scénáře

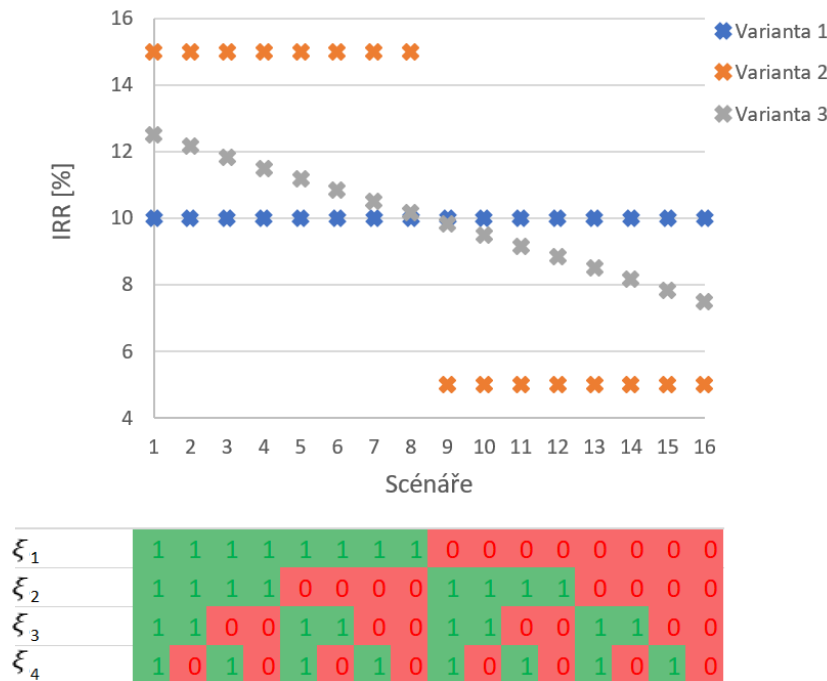
Výše definovaná problematika se týká pouze jednoho scénáře. Takový výpočet by byl vhodný jen v případě, kdy jsou známy přesné informace o budoucím vývoji a zároveň je předem daná kapacita ZEVO. Ve vazbě na kapitolu 5.2, se tedy jedná o druhý stupeň stochastického programování. V mnoha případech se však neřeší problematika, jak správně řídit provoz ZEVO, aby bylo dosaženo co největšího zisku, ale problematika, jakou kapacitu zvolit. Navíc se objevuje nejistota v budoucím vývoji výhřevnosti odpadu, ceny a poptávky po teple nebo dostupnosti odpadu.

Nejdůležitějším krokem při volbě scénářů je jejich definice. To znamená určení parametrů, u kterých je do budoucna velice těžké předpovědět jejich vývoj, a tedy se odhadnuté hodnoty mohou lišit natolik, že tato změna bude mít zásadní vliv na výslednou ekonomiku a provoz. Není například vhodné se podrobněji věnovat ceně kovového šrotu, jelikož příjmy za jeho prodej nejsou natolik významné, aby se její změna nějak výrazněji projevila na celkové udržitelnosti ZEVO. Na základě dosavadních zkušeností byly vybrány jako nejdůležitější parametry.

- Výhřevnost
  - Zde se může jednat o scénáře zachycující nejen počáteční hodnotu výhřevnosti pro první rok provozu, tak i její následný vývoj (stagnace, pokles, nárůst).
- Výše skládkovacího poplatku
  - Jak bylo zmíněno v úvodu, tak se pomocí legislativních změn snaží celá Evropa snížit podíl skládkovaného odpadu. Zvýšení skládkovacího poplatku by mělo vést k upřednostňování ZEVO před skládkami. To by značně ovlivnilo křivku závislosti ceny na bráně na dostupném množství odpadu.
- Cena za elektrickou energii
  - Jako významná se jeví i cena za elektrickou energii, která se podílí na celkových příjmech z necelých 10 %, viz (Putna, 2018).
- Poptávka a cena po teple
  - Jak již bylo zmíněno výše, tak příjmy za prodej tepla jsou nepochybně pro ekonomiku ZEVO významné a závislé na dostupné síti CZT. Právě možný rozpad nebo rozšíření těchto sítí značně ovlivňuje doporučenou kapacitu.

U všech zmíněných parametrů se předpokládá konečný počet realizací. Tedy při výpočtu by se dalo postupovat podle vztahu dle scénářového přístupu, ale je potřeba definovat pravděpodobnost s jakou daný parametr bude nabývat určité hodnoty. Definovat tuto hodnotu je však u mnoha z nich dost

složité. Často se proto používá ekvidistantní rozdělení pravděpodobnosti, což může vést ke značnému zkreslení odhadu. I přes kvalitní definici pravděpodobností, s jakou dané scénáře nastanou, není snadné určit, jaká varianta bude nejvhodnější, viz obr. 50.



Obr. 50 Porovnání kvality variant na základě scénářů

Tento graf zobrazuje vypočtenou hodnotu IRR tří různých variant ZEVO na základě scénářů. Varianty ZEVO mohou být specifikované kapacitou, typem turbíny apod. Scénáře jsou definovány pomocí diskretních náhodných veličin  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ , které mohou nabývat pouze dvou hodnot. Pro lepší představu jsou hodnoty odlišeny červenou a zelenou barvou, kde zelená reprezentuje příznivější vliv na ekonomiku ZEVO.

Pokud by v tomto případě měly všechny scénáře stejnou pravděpodobnost nastoupení, pak je otázkou, podle kterého kritéria vybírat. Varianta 1 je stabilní pro všechny scénáře, ale varianta 2 může dosáhnout nejvyššího IRR za podmínky, že náhodná veličina  $\xi_1$  nabude zelené hodnoty a nakonec varianta 3, která se dá označit jako kompromisní. V některých scénářích je lepší než varianta 1, ale v nepříznivých scénářích nedojde k takovému poklesu jako u varianty 2. Z pohledu přístupu HN jsou všechny varianty stejné dobré, takže pouhé doporučení, která z variant je nejlepší je zavádějící. Je tedy potřeba podrobnější výpočet, jehož výsledkem by byl podobný graf, jako je na obr. 50. V závislosti na něm by se dal například udělat podrobnější výzkum náhodné veličiny  $\xi_1$ , která je podle grafu klíčová.

Na tomto jednoduchém příkladu bylo vysvětleno, proč je vhodné se zabývat plnou enumerací všech navržených scénářů, i když to značně zvýší výpočtovou náročnost. V rámci této práce byl ve spolupráci s kolegy ÚPI vytvořen výpočtový nástroj HPPC (heat-and-power plants cooperation) (Janošák, 2018), jehož podstata a tvorba byla představena v kapitole 5. Taktéž došlo k vývoji nástroje Parallel GAMS (Janošák, 2019), který umožňuje vhodně rozdělit výpočty scénářů na jednotlivá jádra procesoru a počítat je paralelně, což výrazně snižuje výpočetní čas u představené úlohy.

## 6 ZÁVĚR

V této dizertační práci byl představen příspěvek autora v aktuální problematice OH, který spočívá ve využití znalostí operačního výzkumu pro vývoj prakticky použitelných výpočtových nástrojů pro koncepční plánování a hodnocení ekonomické udržitelnosti vybraných systémů nakládání s odpady. Byly zde popsány dva základní problémy.

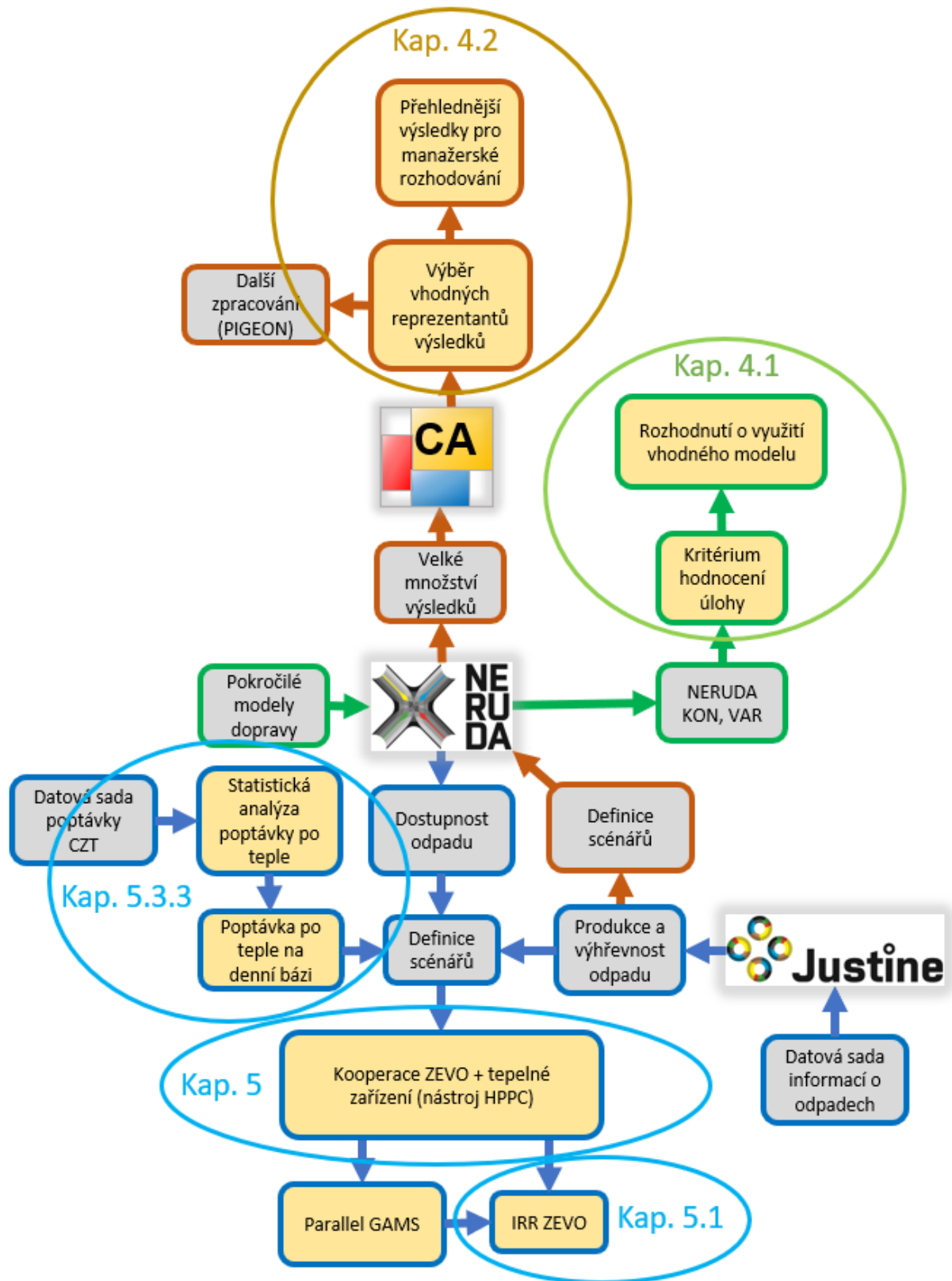
První rozšiřuje dlouhodobě vyvíjený nástroj NERUDA a zahrnuje dva dílčí podproblémy. Oba se týkají dopravní úloh. Jejich důležitým výstupem je cena definovaná pro jednotlivé producenty odpadu. Bohužel řešení dopravní úlohy nástrojem NERUDA z tohoto pohledu nedává jasné řešení (víceznačnost). Modelově totiž dochází v jednotlivých uzlech ke stékání a roztékání toků odpadu, tím se ztrácí informace o celkovém toku odpadu od producenta ke zpracovateli. Pro odhad variability výsledků (míra víceznačnosti) byl navržen nástroj PIGEON. Jeho výpočet je poměrně náročný a při úlohách obsahující více scénářů ho není možné aplikovat na všechny, viz hnědá větev na obr. 51. Snížení rozsahu této úlohy je možné důkladnou analýzou výsledků NERUDA a jejich rozřazením do určitých skupin. V rámci této práce byl představen přístup rozřazení pomocí shlukové analýzy. Za pomoci nástroje CAO je zde ilustrován podrobný postup vytvoření shluků a jejich následná kvalifikace, viz kap. 4.2. Rozdělení na jednotlivé shluky je v některých případech nevhodné, zvláště pokud se jedná o rozsáhlé úlohy, ale v mnoha případech se jeví jako vhodný prostředek ke snazší interpretaci výsledků či jejich využití v jiných výpočetních nástrojích.

Další představený typ úlohy je taktéž spjatý s výpočtovým nástrojem NERUDA. V minulých letech došlo k významným pokrokům z hlediska vývoje technickoekonomických modelů dopravy. V rámci nich lze vyčíslit cenu za dopravu komplexnějším způsobem. Její implementace do modelu není jednoduchá, a proto je potřeba analyzovat, zda její využití přinese významný vliv na konečné výsledky. Aplikace přesnějšího modelu dopravní ceny do nástroje NERUDA vyžadovala jeho modifikaci. V práci byla definována modelová úloha, na které byl demonstrován vliv modifikace nástroje NERUDA na výpočetní čas a výsledky, viz kap. 4.1 (zelená větev na obr. 51). Ukázalo se, že výpočtová náročnost narostla a v některých případech došlo k výrazné změně výsledků. U výsledků, ve kterých ke změně nedošlo, není potřeba přecházet k modifikovanému nástroji NERUDA. Autor v této práci navrhnul postup, kterým lze tyto případy identifikovat a již před výpočtem se vhodně rozhodnout jakou variantu nástroje NERUDA použít.

Druhý problém, který byl v práci popsán, se týká modelování koncepce nového ZEVO integrovaného do existujícího teplárenského zdroje, viz modrá větev na obr. 51 (kap. 5). Výstupem je nástroj pro plánování integrace ZEVO do sítí CZT a komplexní posouzení potenciálu uplatnění vyrobeného tepla, které má výrazný vliv na jeho ekonomiku. Nástroj je schopen posoudit dosavadní stav teplárenského provozu a možnosti integrace ZEVO. V návaznosti na to definuje změnu v provozních podmínkách, která tím nastane. To mimo jiné znamená, že se model dá použít i pro analýzu současného provozu s následným doporučením změn samostatných teplárenských systémů bez integrace ZEVO. V práci byl popsán postup při vytváření vhodného modelu a představeny přístupy k možným vyhodnocení výsledků. Byly zde zmíněny možnosti stochastického programování HN a WS, které se však z hlediska robustnosti řešení nemusí jevit jako nejvhodnější. Doporučen byl přístup plné enumerace v rámci zvolených scénářů, který vyžaduje kvalitní výpočtový nástroj s dostatečnou přesností, ale zároveň není výpočtově náročný. V rámci této práce byla vytvořena první verze takového nástroje. Vzhledem k jeho výpočtové náročnosti bylo využito možné dekompozice úlohy na dílčí celky, které potom mohly být řešeny paralelně.



Pro snadnější paralelizaci výpočtu byl vytvořen nástroj Parallel GAMS, který zajistí optimální rozložení úloh na jednotlivá jádra procesoru a výrazně zredukuje výpočtovou náročnost celé úlohy.



Obr. 51 Schéma dizertační práce

## 7 TVŮRČÍ AKTIVITY

### 2019

JANOŠŤÁK, František, TALPA, Jaroslav, PAVLAS, Martin, ŠOMPLÁK, Radovan a Jiří GREGOR, 2019. CO & PG; *Softwarová implementace redukčních technik pro wait and see přístup*. web Ústav proceňování inženýrství [http://www.upi.fme.vutbr.cz/media/software/dms\\_spetep\\_wp1\\_r1.rar](http://www.upi.fme.vutbr.cz/media/software/dms_spetep_wp1_r1.rar). URL: <http://upi.fme.vutbr.cz/>. (software)

### 2018

JANOŠŤÁK, František, PUTNA, Ondřej a Martin PAVLAS, 2018. V020 HPPC; *Tool for investment project optimization and operation optimization with focus on efficient energy utilization*. web Ústav proceňování inženýrství [www.upi.fme.vutbr.cz](http://www.upi.fme.vutbr.cz/). URL: <http://upi.fme.vutbr.cz/>. (software)

## 8 PUBLIKAČNÍ ČINNOST

### 2020

PUTNA, Ondřej, František JANOŠŤÁK a Martin PAVLAS, 2020. Greenhouse gas credits from integrated waste-to-energy plant. *Journal of Cleaner Production*. **270**(1), 1-9. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2020.122408

### 2019

PUTNA, Ondřej, JANOŠŤÁK, František a Martin PAVLAS, 2019. Greenhouse Gas Credits from Integrated Waste-to-Energy Plant. In *Book of abstracts. Proceedings of SDEWES 2017 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environmental Systems*. Zagreb, Croatia: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb. 1-11. ISSN: 1847-7178.

JANOŠŤÁK, František, ŠOMPLÁK, Radovan a Martin PAVLAS, 2019. *Výběr výrobků se zaměřením na potenciál pro zvýšení reálné recyklovatelnosti produkováných odpadů (D1.4.4)*.

JANOŠŤÁK, František, PUTNA, Ondřej a Martin PAVLAS, 2019. Energy Dispatch Model for Integrated Waste-to-Energy Plant. *Chemical Engineering Transactions*, **76**(1), 1435-1440. ISSN: 2283-9216. Dostupné z: doi: 10.3303/CET1976240

JANOŠŤÁK, František, ŠOMPLÁK, Radovan, PUTNA, Ondřej a Martin PAVLAS, 2019. *Model pro stanovení možné redukce dopravní infrastruktury na základě typu sítě a přípustné míry nepřesnosti (D1.4.10)*.

JANOŠŤÁK, František, ŠOMPLÁK, Radovan a Martin PAVLAS, 2019. *Metodika a postup místního šetření se zaměřením na materiálově využitelné složky odpadu (D1.4.2)*.

### 2018

ROSECKÝ, Martin, ŠOMPLÁK, Radovan, JANOŠŤÁK, František a Josef BEDNÁŘ, 2018. Heuristic Approach to Multivariate Inverse Prediction Problem Using Data Reconciliation. *Mendel Journal series*, **24**(1), 71-78. ISSN: 1803-3814. Dostupné z: doi: 10.13164/mendel.2018.1.071

PUTNA, Ondřej, JANOŠŤÁK, František a Martin PAVLAS, 2018. Modelling of Existing Heating Plant Replacement with a Waste to Energy Plant and a Peak-Load Natural Gas Boiler. *Chemical Engineering Transactions*, **70**(1), 1615-1620. ISSN: 2283-9216. Dostupné z: doi: 10.3303/CET1870270

PUTNA, Ondřej; JANOŠŤÁK, František; PAVLAS, Martin; STEHLÍK, Petr, 2018. *Integration of WtE plant into energy producing system.*

PUTNA, Ondřej, František JANOŠŤÁK, Radovan ŠOMPLÁK a Martin PAVLAS, 2018. Demand modelling in district heating systems within the conceptual design of a waste-to-energy plant. *Energy*. **163**, 1125-1139. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2018.08.059

#### **2017**

PUTNA, Ondřej, JANOŠŤÁK, František, ŠOMPLÁK, Radovan, PAVLAS, Martin, 2017. Short-time Fluctuations and their Impact on Waste-to-Energy Conceptual Design Optimised by Multi-stage Stochastic Model. *Chemical engineering transaction*, **61**(1), 955-960. ISSN: 2283-9216.

JANOŠŤÁK, František, TOUŠ, Michal, PAVLAS, Martin, KROPÁČ, Jiří a Radovan ŠOMPLÁK, 2017. Efektivní plánování kombinované výroby tepla a elektřiny při spalování odpadu. *Automa*, **12**, 36-37. ISSN: 1210-9592.

HRABEC, Dušan, ŠOMPLÁK, Radovan, NEVRLÝ, Vlastimír, JANOŠŤÁK, František, ROSECKÝ, Martin a Jakub KŮDELA, 2017. Robust Facility Location Problem for Bio-waste Transportation. *Chemical engineering transaction*, **61**, 1093-1098. ISSN: 2283-9216.

#### **2016**

JANOŠŤÁK, František, Martin PAVLAS, Ondřej PUTNA, Radovan ŠOMPLÁK a Pavel POPELA, 2016. Heuristic approximation and optimization for waste-to-energy capacity expansion problem. *Mendel Journal Series*. **22**, 123-130. ISSN 1803-3814.

## 9 LITERATURA

ANDERBERG, Michael R., 1973. *Cluster analysis for applications*. New York: Academic Press. ISBN 978-0-12-057650-0.

ASRATIAN, Armen S., Tristan M. J. DENLEY a Roland HÄGGKVIST, 1998. *Bipartite graphs and their applications*. New York: Cambridge University Press. ISBN 05-215-9345-X.

AZARMAND, Zeinab a Ensiyeh NEISHABOURI, 2009. Location Allocation Problem. Facility Location. Heidelberg: Physica-Verlag HD, 2009-04-27, 93-109. *Contributions to Management Science*. ISBN 978-3-7908-2150-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-7908-2151-2\_5

BAČÍK, Ondřej, 2005. *Jak na bioodpady? Zkušenosti z Německa (3)* [online]. Biom.cz [cit. 2022-07-20]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/jak-na-bioodpady-zkusenosti-z-nemecka-3>

BARBOSA-PÓVOA, Ana Paula, Cátia DA SILVA a Ana CARVALHO, 2018. Opportunities and challenges in sustainable supply chain: An operations research perspective. *European Journal of Operational Research*. **268**(2), 399-431. ISSN 03772217. Dostupné z: doi:10.1016/j.ejor.2017.10.036

BEIHONG, Zhang a Long WEIDING, 2006. An optimal sizing method for cogeneration plants. *Energy and Buildings*. **38**(3), 189-195. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2005.05.009

BISCHI, Aldo, Leonardo TACCARI, Emanuele MARTELLI, Edoardo AMALDI, Giampaolo MANZOLINI, Paolo SILVA, Stefano CAMPANARI a Ennio MACCHI, 2014. a detailed MILP optimization model for combined cooling, heat and power system operation planning. *Energy*. **74**, 12-26. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2014.02.042

BOHM, Robert A., David H. FOLZ, Thomas C. KINNAMAN a Michael J. PODOLSKY, 2010. The costs of municipal waste and recycling programs. *Resources, Conservation and Recycling*. **54**(11), 864-871. ISSN 09213449. Dostupné z: doi:10.1016/j.resconrec.2010.01.005

BOONMEE, Chawis, Mikiharu ARIMURA a Takumi ASADA, 2018. Location and allocation optimization for integrated decisions on post-disaster waste supply chain management: On-site and off-site separation for recyclable materials. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. **31**, 902-917. ISSN 22124209. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijdr.2018.07.003

BUORO, Dario, Melchiorre CASISI, Alberto DE NARDI, Piero PINAMONTI a Mauro REINI, 2013. Multicriteria optimization of a distributed energy supply system for an industrial area. *Energy*. **58**, 128-137. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2012.12.003

ČR. *Zákon č. 541/2020 Sb. ze dne 23.12.2020 o odpadech*. 2020

D'AMORE, Federico a Fabrizio BEZZO, 2016. *Strategic optimisation of biomass-based energy supply chains for sustainable mobility*. **87**, 68-81. ISSN 00981354. Dostupné z: doi:10.1016/j.compchemeng.2016.01.003

DANESHZAND, Farzaneh a Razieh SHOELEH, 2009. Multifacility Location Problem. *Facility Location*. Heidelberg: Physica-Verlag HD, 2009-04-27, 69-92. *Contributions to Management Science*. ISBN 978-3-7908-2150-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-7908-2151-2\_4

DE MEYER, Annelies, Dirk CATTRYSSE a Jos VAN ORSHOVEN, 2015. a generic mathematical model to optimise strategic and tactical decisions in biomass-based supply chains (OPTIMASS). *European Journal of Operational Research*. **245**(1), 247-264. ISSN 03772217. Dostupné z: doi:10.1016/j.ejor.2015.02.045

Energie - vývoj cen energií na komoditních trzích, 2022. *Kurzy.cz* [online]. [cit. 2022-07-19]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/komodity/energie/>

EU. *Směrnice evropského parlamentu a rady 94/62/ES ze dne 20. prosince 1994 o obalech a obalových odpadech, Úřední věstník evropských společenství L 312/3. 1994*

EU. *Směrnice rady 1999/31/ES ze dne 26. dubna 1999 o skládkách odpadů, Úřední věstník evropských společenství L 182/1. 1999*

EU. *Směrnice evropského parlamentu a rady (ES) č. 98/2008 ze dne 19. listopadu 2008 o odpadech a o zrušení některých směrnic, Úřední věstník evropských společenství L 312/3. 2008*

EU. *Směrnice evropského parlamentu rady (EU) 2018/850 ze dne 30. května 2018, kterou se mění směrnice 1999/31/ES o skládkách odpadů, Úřední věstník Evropské unie L 150/100. 2018*

EU. *Směrnice evropského parlamentu 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*

EU. *Směrnice evropského parlamentu 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*

FAZLOLLAHI, Samira, Pierre MANDEL, Gwenaelle BECKER a Francois MARÉCHAL, 2012. Methods for multi-objective investment and operating optimization of complex energy systems. *Energy*. **45**(1), 12-22. ISSN 03605442. Dostupné z: [doi:10.1016/j.energy.2012.02.046](https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.046)

FAZLOLLAHI, Samira, Stephane Laurent BUNGNER, Pierre MANDEL, Gwenaelle BECKER a François MARÉCHAL, 2014. *Multi-objectives, multi-period optimization of district energy systems: I. Selection of typical operating periods*. **65**, 54-66. ISSN 00981354. Dostupné z: [doi:10.1016/j.compchemeng.2014.03.005](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.03.005)

FERDAN, Tomáš, Radovan ŠOMPLÁK a Martin PAVLAS, 2014. Improved Feasibility Analysis under Volatile Conditions: Case of Waste-to-Energy. *Chemical Engineering Transactions*. **39**, 691-696. Dostupné z: [doi:10.3303/CET1439116](https://doi.org/10.3303/CET1439116).

FERDAN, Tomáš, Radovan ŠOMPLÁK, Lenka ZAVÍRALOVÁ, Martin PAVLAS a Lukáš FRÝBA, 2015. a waste-to-energy project: a complex approach towards the assessment of investment risks. *Applied Thermal Engineering*. **89**, 1127-1136. ISSN 13594311. Dostupné z: [doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.04.005](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.005)

GARCÍA-BARRAGÁN, Juan F., Johan EYCKMANS a Sandra ROUSSEAU, 2019. Defining and Measuring the Circular Economy: a Mathematical Approach. *Ecological Economics*. **157**, 369-372. ISSN 09218009. Dostupné z: [doi:10.1016/j.ecolecon.2018.12.003](https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.12.003)

GENOVESE, Andrea, Adolf A. ACQUAYE, Alejandro FIGUEROA a S.C. Lenny KOH, 2017. Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications. *Omega*. **66**, 344-357. ISSN 03050483. Dostupné z: [doi:10.1016/j.omega.2015.05.015](https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.05.015)

GREGOR Jiří, Radovan ŠOMPLÁK a Martin PAVLAS, 2015. Transportation Cost as an Integral Part of Supply Chain Optimisation in the Field of Waste Management, *Chemical Engineering Transactions*, **56**, 1927-1932. Dostupné z: [doi:10.3303/CET1756322](https://doi.org/10.3303/CET1756322)

GREGOR, J. Pokročilé modely logistiky v odpadovém hospodářství. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 180 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.

HAIR, Joseph F., William C. BLACK, Barry J. BABIN a Rolph E. ANDERSON, 2010. *Multivariate Data Analysis*. 7th Edition. New York: Pearson. ISBN 978-0138132637.

HOORNWEG, Daniel a Perinaz BHADA-TATA, 2012. *What a waste: a global review of solid waste management*. Urban development series. Knowledge papers no. 15. Washington, D.C.: World Bank.

JANOŠŤÁK, F. Aplikace optimalizace pro návrh subsystémů energetických celků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 23 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D.

JANOŠŤÁK, František, Martin PAVLAS, Ondřej PUTNA, Radovan ŠOMPLÁK a Pavel POPELA, 2016a. Heuristic approximation and optimization for waste-to-energy capacity expansion problem. *Mendel Journal Series*. **22**, 123-130. ISSN 1803-3814.

JANOŠŤÁK, F. Modely toků v síti pro odpadové hospodářství. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016b. 43 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D.

JANOŠŤÁK, František, PUTNA, Ondřej a Martin PAVLAS, 2018. V020 HPPC; *Tool for investment project optimization and operation optimization with focus on efficient energy utilization*. web Ústav proceňování inženýrství [www.upi.fme.vutbr.cz](http://upi.fme.vutbr.cz). URL: <http://upi.fme.vutbr.cz/>. (software)

JANOŠŤÁK, František, TALPA, Jaroslav, PAVLAS, Martin, ŠOMPLÁK, Radovan a Jiří GREGOR, 2019. CO & PG; *Softwarová implementace redukčních technik pro wait and see přístup*. web Ústav proceňování inženýrství [http://www.upi.fme.vutbr.cz/media/software/dms\\_spetep\\_wp1\\_r1.rar](http://www.upi.fme.vutbr.cz/media/software/dms_spetep_wp1_r1.rar). URL: <http://upi.fme.vutbr.cz/>. (software)

LAHDELMA, Risto a Henri HAKONEN, 2003. An efficient linear programming algorithm for combined heat and power production. *European Journal of Operational Research*. **148**(1), 141-151. ISSN 03772217. Dostupné z: doi:10.1016/S0377-2217(02)00460-5

LAM, Hon Loong, Jiří Jaromír KLEMEŠ a Zdravko KRAVANJA, 2011. Model-size reduction techniques for large-scale biomass production and supply networks. *Energy*. **36**(8), 4599-4608. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2011.03.036

LIN, Xuebin, Fei WANG, Yong CHI, Qunxing HUANG a Jianhua YAN, 2015. a simple method for predicting the lower heating value of municipal solid waste in China based on wet physical composition. *Waste Management*. **36**, 24-32. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2014.11.020

LIU, Mingxi, Yang SHI a Fang FANG, 2014. Combined cooling, heating and power systems: a survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **35**, 1-22. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2014.03.054

KALL, Peter and Stein W. WALLACE. Stochastic Programming. 1st ed. New York: John Wiley & Sons, 1994, 326 p. ISBN 978-0471951087.

MALINAUSKAITE, Jurgita, Hussam JOUHARA, Dina CZAJCZYŃSKA, et al., 2017. Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. *Energy*. **141**, 2013-2044. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2017.11.128

MORADI, Esmaeel a Morteza BIDKHORI, 2009. Single Facility Location Problem. *Facility Location*. Heidelberg: Physica-Verlag HD, 2009-04-27, 37-68. Contributions to Management Science. ISBN 978-3-7908-2150-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-7908-2151-2\_3

Municipal waste by waste management operations, 2021. *Eurostat* [online]. [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV\\_WASMUN\\_\\_custom\\_2883863/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_WASMUN__custom_2883863/default/table?lang=en)

Municipal waste statistics, 2021. *Eurostat: Statistics Explained* [online]. [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal\\_waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics)

NEVRLÝ, Vlastimír, Radovan ŠOMPLÁK, Ondřej PUTNA a Martin PAVLAS, 2019. Location of mixed municipal waste treatment facilities: Cost of reducing greenhouse gas emissions. *Journal of Cleaner Production*. **239**. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2019.118003

ONDERLIČKA, T. Aplikace shlukové analýzy na reálných datech: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav matematického inženýrství, 2016. 35 s. Vedoucí práce RNDr. Libor Žak, Ph.D.

PAVLAS, Martin, Radovan ŠOMPLÁK, Veronika SMEJKALOVÁ, Vlastimír NEVRLÝ, Lenka ZAVÍRALOVÁ, Jakub KŮDELA a Pavel POPELA, 2017. Spatially distributed production data for supply chain models - Forecasting with hazardous waste. *Journal of Cleaner Production*. **161**, 1317-1328. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2017.06.107

PIACENTINO, Antonio a Fabio CARDONA, 2008. EABOT – Energetic analysis as a basis for robust optimization of trigeneration systems by linear programming. *Energy Conversion and Management*. **49**(11), 3006-3016. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2008.06.015

*Produkce, využití a odstranění odpadů za období 2020* [online], 2021. Praha: Český statistický úřad [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/143330119/28002021.pdf/41f799e9-3ffb-4702-a517-0c2dc1525144?version=1.3>

PUTNA, Ondřej, František JANOŠŤÁK, Radovan ŠOMPLÁK a Martin PAVLAS, 2018. Demand modelling in district heating systems within the conceptual design of a waste-to-energy plant. *Energy*. **163**, 1125-1139. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2018.08.059

REN, Hongbo, Weijun GAO a Yingjun RUAN, 2008. Optimal sizing for residential CHP system. *Applied Thermal Engineering*. **28**(5-6), 514-523. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.05.001

RONG, Aiyang a Risto LAHDELMA, 2007. Efficient algorithms for combined heat and power production planning under the deregulated electricity market. *European Journal of Operational Research*. **176**(2), 1219-1245. ISSN 03772217. Dostupné z: doi:10.1016/j.ejor.2005.09.009

ROUSSEEUW, Peter J., 1987. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. **20**, 53-65. ISSN 03770427. Dostupné z: doi:10.1016/0377-0427(87)90125-7

Rozbory skladby směsného komunálního odpadu z obcí v roce 2020, 2021. *Ekokom* [online]. [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <https://www.ekokom.cz/rozbory-skladby-smesneho-komunalniho-odpadu-z-obci-v-roce-2020/>

Sjednocení technické a roční kapacity ZEVO Malešice, 2019. Cenia [online]. [cit. 2022-07-25]. Dostupné z: [https://portal.cenia.cz/eiasea/download/RUIBX01aUDQ4M196YXBpczFWUERPQ181MTg3NDU0OTQ3ODQ0MDQxNzAwLnBkZg/MZP483\\_zapis1VP.pdf](https://portal.cenia.cz/eiasea/download/RUIBX01aUDQ4M196YXBpczFWUERPQ181MTg3NDU0OTQ3ODQ0MDQxNzAwLnBkZg/MZP483_zapis1VP.pdf)

SMEJKALOVÁ, Veronika. Pokročilé prognostické modely v oblasti odpadového hospodářství. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137882>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Martin Pavlas. (nepublikovaná dizertační práce)

SZÁSZIOVÁ, L. Analýza interakcí v odpadovém hospodářství. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 93 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.

ŠOMPLÁK, Radovan, Pavel POPELA, Martin PAVLAS, Tomáš FERDAN a Michal TOUŠ, 2012. a Stochastic Programming Model for Waste-to-Energy Facility Planning, *Mendel Journal series*. 180-185. ISBN: 978-80-214-4540-6. ISSN: 1803-3814.

ŠOMPLÁK, Radovan, Tomáš FERDAN, Martin PAVLAS a Pavel POPELA, 2013. Waste-to-energy facility planning under uncertain circumstances. *Applied Thermal Engineering*. **61**(1), 106-114. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.04.003

ŠOMPLÁK, Radovan, Martin PAVLAS, Jiří KROPÁČ, Ondřej PUTNA a Vít PROCHÁZKA, 2014. Logistic model-based tool for policy-making towards sustainable waste management. *Clean Technologies and Environmental Policy*. **16**(7), 1275-1286. ISSN 1618-954X. Dostupné z: doi:10.1007/s10098-014-0744-5

ŠOMPLÁK, Radovan, Martin PAVLAS, Jiří KROPÁČ, 2015. Projekt MŽP s názvem Návrh optimální sítě zařízení k nakládání s odpady v rámci celé ČR včetně stanovení potřebných kapacit těchto zařízení ve všech krajích, příloha 1.1.2 Návrh optimální sítě zařízení v krajích a v ČR, EY Česká republika, 2015.

ŠOMPLÁK, R. Efektivní plánování investic do technologií pro energetické využití odpadů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 108 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.

ŠOMPLÁK, Radovan, Martin PAVLAS, Vlastimír NEVRILÝ, Michal TOUŠ a Pavel POPELA, 2019. Contribution to Global Warming Potential by waste producers: Identification by reverse logistic modelling. *Journal of Cleaner Production*. **208**, 1294-1303. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2018.10.165

TALPA, J. Modelovací jazyky pro optimalizaci. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 68 s. Vedoucí RNDr. Pavel Popela, Ph.D.

THORIN, Eva, Heike BRAND a Christoph WEBER, 2005. Long-term optimization of cogeneration systems in a competitive market environment. *Applied Energy*. **81**(2), 152-169. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2004.04.012

TONG, Kailiang, Fengqi YOU a Gang RONG, 2014. *Robust design and operations of hydrocarbon biofuel supply chain integrating with existing petroleum refineries considering unit cost objective*. **68**, 128-139. ISSN 00981354. Dostupné z: doi:10.1016/j.compchemeng.2014.05.003

TOUŠ, Michal, PAVLAS, Martin, STEHLÍK, Petr and POPELA, Pavel, 2010, Effective biomass integration into existing combustion plant, *Chemical Engineering Transactions*, **21**, 403-408. Dostupné z: doi:10.3303/CET1021068

TOUŠ M., FERDAN T., PAVLAS M., UCEKAJ V. a POPELA P., 2011. Waste-to-energy plant integrated into existing energy producing system, *Chemical Engineering Transactions*, **25**(1), 501-506. ISSN: 1974-9791. Dostupné z: doi:10.3303/CET1125084



UCEKAJ, V. Analýza možností nakládání s komunálními odpady v rámci mikroregionu. Brno, 2010. 153 s. Disertační práce na Vysokém učení technickém v Brně na Fakultě strojního inženýrství na Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.

VEVERKA, Zdeněk, PAVLAS, Martin, GREGOR, Jiří, KROPÁČ, Jiří, BOUDA, Zbyněk, a Jana SUZOVÁ, 2021. V4 TIRSMZP719; Metodika pro stanovení složení směsného komunálního odpadu z obcí a komunálního odpadu. Produkt byl předán uživateli výsledku: Ministerstvo životního prostředí. Cit. 3.6.2022. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/cz/metodika\\_stanoveni\\_sko\\_ko](https://www.mzp.cz/cz/metodika_stanoveni_sko_ko)

WAHLROOS, Mikko, Matti PÄRSSINEN, Jukka MANNER a Sanna SYRI, 2017. Utilizing data center waste heat in district heating – Impacts on energy efficiency and prospects for low-temperature district heating networks. *Energy*. **140**, 1228-1238. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2017.08.078

Waste-to-Energy Plants in Europe in 2017, 2019. *CEWEP: The Confederation of European Waste-to-Energy Plants* [online]. [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <https://www.cewep.eu/waste-to-energy-plants-in-europe-in-2017/>

Waste-to-Energy Resource Recovery, 2010. *Earth habitat* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://earthhabitat.wordpress.com/2010/02/25/waste-to-energy-resource-recovery-plant-in-broward-county-florida/>

WEBER, Thomas A., 2014. On the (non-)equivalence of IRR and NPV. *Journal of Mathematical Economics*. **52**, 25-39. ISSN 03044068. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmateco.2014.03.006

WICHAPA, Narong a Porntep KHOKHAJAIKIAT, 2017. Solving multi-objective facility location problem using the fuzzy analytical hierarchy process and goal programming: a case study on infectious waste disposal centers. *Operations Research Perspectives*. **4**, 39-48. ISSN 22147160. Dostupné z: doi:10.1016/j.orp.2017.03.002

ZANJIRANI FARAHANI, Reza, Wai Yuen SZETO a Saeed GHADIMI, 2017. The single facility location problem with time-dependent weights and relocation cost over a continuous time horizon. *Journal of the Operational Research Society*. **66**(2), 265-277. ISSN 0160-5682. Dostupné z: doi:10.1057/jors.2013.169

ZHAO, Xin-gang, Gui-wu JIANG, Ang LI a Ling WANG, 2016. Economic analysis of waste-to-energy industry in China. *Waste Management*. **48**, 604-618. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2015.10.014

## PŘÍLOHA: NÁSTROJE ÚPI VYUŽÍVANÉ V DIZERTAČNÍ PRÁCI

### NERUDA<sup>4</sup>

NERUDA je unikátní výpočetní nástroj založený na jednoduchém principu implementovaném ve složitém problému. Optimalizuje strategii nakládání s odpady v konkrétním regionu z pohledu producenta odpadů (z hlediska ekonomiky a životního prostředí).



Nástroj alokuje zpracovatelské kapacity a navrhuje toky odpadů mezi producenty a zpracovateli v rámci modelovaného regionu. Region je rozdělen do stovek uzlů, aby bylo možné simulovat jednotný trh s odpady a interakci související s konkurenčním prostředím. Začleňuje ZEVO do energetické koncepce měst. Analyzuje různé technologie zpracování odpadů.

Využitím přispívá potencionálním investorům, kteří mají zájem o výstavbu nových ZEVO. Vládním subjektům poskytuje podporu při tvorbě strategie odpadového hospodářství na úrovni země či regionu. Stávajícím provozovatelům pomáhá optimalizovat plán provozu.

#### **Koncepce na regionální a národní úrovni**

V roce 2013 byl NERUDA aplikován na analýzu budoucí poptávky po nových ZEVO v ČR. Uvažovalo se s plánovaným zákazem skládkování. Byl řešen potenciál dodávky tepla v rámci stávajících systémů dálkového vytápění.

#### **Proveditelnost investic do energetického využití odpadu**

Posouzení ekonomické udržitelnosti projektů v konkrétní lokalitě. Hodnocena byla rizika jako změny v produkci a kvalitě zbytkového odpadu, který nelze recyklovat, ceny energií, vývoj legislativy a strategie konkurence.

#### **Optimalizace dopravy odpadů**

Optimalizace svozu odpadu, vyhledání místa pro předávací stanice a jejich kapacity. Návrh vhodné technologie přepravy odpadů od původce ke zpracovateli (silnice – železnice – intermodální systém). Plánování dopravy na denní bázi.

#### **Jednotné modelování trhu s odpady**

Aplikace nástroje NERUDA pro region zahrnující více než jednu zemi. Modelování dopadů různého vývoje klíčových parametrů v jednotlivých zemích EU (výroba, kapacity, ekologické daně) pro efektivní využití a plánování kapacit ZEVO.

---

<sup>4</sup> <https://upi.fme.vutbr.cz/veda-vyzkum/neruda/>

## Justine<sup>5</sup>

Justine představuje sofistikovaný nástroj pro současnou předpověď množství a parametrů odpadu na různých územních celcích. Z obecného hlediska lze nástroj aplikovat

na jakýkoli problém, kde jsou prognózy komodity prováděny na základě prostorově rozložených dat z předchozích let. Předpokládá se, že tyto údaje mohou být neúplné nebo dokonce nesprávné.

Klíčové myšlenky tohoto nástroje jsou založeny na expertních znalostech, heuristických přístupech, zdravém rozumu a v neposlední řadě na pokročilých statistických a optimalizačních technikách.

Justine přispívá zkoumání historických údajů z různých regionů a formulování obecných modelů produkce a složení odpadu. Využívá příkladů osvědčených dat z regionů s vysokou mírou přesnosti. Historická data z jednoho regionu mohou sloužit jako scénář pro jiný region. Nástroj je použitelný pro jakýkoli problém, kde jsou kvantitativní data extrapolována simultánně pro mnoho uzlů.



---

<sup>5</sup> <https://upi.fme.vutbr.cz/veda-vyzkum/justine/>